



TITLE:

滞水性地盤の止水法に関する土質
化学的研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

川地, 武

CITATION:

川地, 武. 滞水性地盤の止水法に関する土質化学的研究. 京都大学, 1987,
農学博士

ISSUE DATE:

1987-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r6137>

RIGHT:

新 制
農
453
一 附 図

滯水性地盤の止水法に関する

土質化学的研究

川 地 武

新 制
農
453
京大附図

滯水性地盤の止水法に関する
土質化学的研究

川地 武

目 次

第一部 序論

第一章 本研究の目的と構成	1
---------------	---

第二章 本研究の立場	4
------------	---

第二部 地中連続壁工法における逸泥防止用安定液の開発

第一章 地中連続壁工法における安定液と逸泥

1. はじめに	6
2. 地中連続壁工法	6
3. 安定液の機能	9
4. 安定液の調合と管理	11
5. 逸泥の原因と防止対策	11

第二章 地中における安定液の浸透

1. はじめに	15
2. 実験方法	15
3. 実験結果	17
4. 考察	21
5. おわりに	24

第三章 逸泥防止用ポリマ-安定液の開発

1. はじめに	26
2. GuarGum溶液の性質	26
3. ゲル化したGuarGum溶液の性質	31
4. GuarGumゲルの逸泥防止効果	37
5. おわりに	39

第四章 逸泥防止用ポリマ-安定液の適用例(1)-ビルの地下工事

1. はじめに	40
2. 工事概要	40
3. 試験工事による逸泥防止対策の検討	41
4. 本工事への適用結果	45
5. おわりに	47

第五章 逸泥防止用ポリマ-安定液の適用例(2)-遊水池の遮水壁工事

1. はじめに	48
---------	----

2. 工事概要	48
3. 試験工事	50
4. 本工事における逸泥防止と地下水水質の監視	57
5. おわりに	61

第三部 薬液注入工法における注入効果推定法の開発

第一章 本研究の背景とねらい

1. はじめに	63
2. 薬液注入工法の現状と課題	63
3. 薬液注入工法における施工管理-効果確認の方法-	68
4. おわりに	70

第二章 注入地盤におけるてん充率の測定とその意義

1. はじめに	71
2. 土中の注入材含有量の測定法	71
3. 室内注入土における注入材の分布	74
4. てん充率と注入効果の関係	78
5. おわりに	82

第三章 注入地盤における注入材の分布と地盤改良効果(1)

砂地盤の場合

1. はじめに	83
2. 調査現場	83
3. 調査方法	85
4. 調査結果	86
5. 考察	90
6. おわりに	95

第四章 注入地盤における注入材の分布と地盤改良効果(2)

滞水性砂れき地盤の場合

1. はじめに	97
2. 工事概要	97
3. 試験注入	98
4. シールド掘進部の地盤改良効果	103
5. おわりに	106

第五章 注入地盤における注入材の分布と地盤改良効果(3)

注入材分布から見た注入工法の比較

1. はじめに	107
2. 工事現場の概要	107

3. 試験注入	108
4. シールド掘進部の注入効果	113
5. 考察	115
6. あとがき	118
第六章 温度計測による注入効果推定に関する基礎実験	
1. はじめに	119
2. 実験方法	119
3. 実験結果	121
4. 考察	126
5. おわりに	128
第七章 温度測定による注入効果推定に関する現場適用調査	
1. はじめに	130
2. 調査方法	130
3. 調査結果	132
4. 考察	135
5. おわりに	138
第四部 結論	139
謝辞	144
参考文献	145

第一部 序論

第一章 本研究の目的と構成

本研究は地盤改良の内、止水法に関する技術開発の基礎的事項を究明することにより新たな地盤改良技術の確立を意図するものである。

我が国における建設工事のうち、特に地下工事では湧水に悩まされることが多く工事の成否は湧水対策の良否にかかっているといっても過言ではない。湧水対策には表-1'に示すように地下水位を低下させる水位低下工法と止水工法とがある。止水工法はさらに止水の方法によって表示されたようにいくつかの方法に分けられる。これらのうち地下連続壁工法はビルの地下室、LNGや石油の地下貯蔵タンクの周壁、地下街の側壁、下水処理場の地下壁などの構築に用いられる工法である。また、薬液注入工法は地下鉄、下水道、電気・電話の地下ケーブルの洞道などのように横穴を掘削する場合の止水工法として広く用いられている。本研究ではこの地下連続壁工法と薬液注入工法の適用範囲の拡大および施工精度の向上を図ることを研究の目的としている。

従来、このような施工技術の開発あるいは改良は土木工学、土質力学、機械工学、材料力学などの分野で確立された手法によって取り組まれてきた。しかし、これらの手法のみでは解明できない課題も多く、よりミクロな解析手法として材料化学あるいは土質化学が有効な解析手段となるものと思われる。そこで、著者は土壌学の分野で開発されてきた土を構成する粒子あるいは結合物質のレベルから解析する手法を主として採用し、その有効性を確認することも意図した。

本研究は次に示すように大きく二つの部分から構成されている。すなわち、地下連続壁工法における逸泥防止用安定液に関するものおよび薬液注入工法における注入効果の推定法に関するものである。前者は滞水性の砂れき地盤に地下連続壁工法を適用する際に問題となる逸泥とそれによる地下水汚染の防止法の確立を意図している。また後者では、薬液注入工法の信頼性の向上に不可欠な地盤中の注入材の挙動を精度よく、かつ簡便に推定する手法の開発を意図している。

1 地下連続壁工法における逸泥防止用安定液の開発

- ・ 地中における安定液の浸透挙動の解明
- ・ 特殊ポリマー安定液の特性と逸泥防止効果
- ・ 特殊ポリマー安定液の工事現場への適用と逸泥防止効果の確認
- ・ 特殊ポリマー安定液を適用した際の地下水水質の監視

2 薬液注入工法における注入効果の推定法の開発

- 3

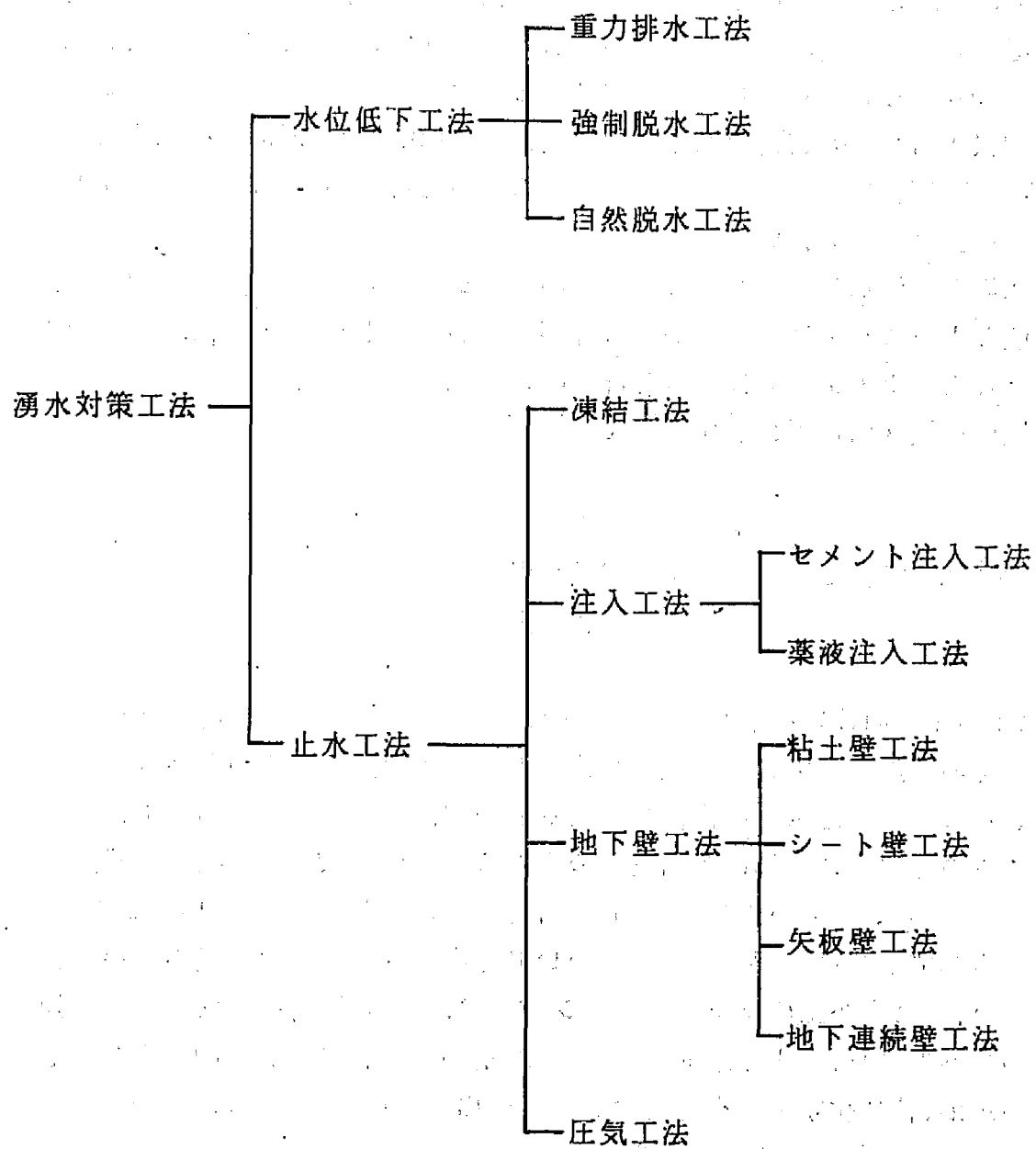


表-1.1 湧水対策工法の分類

第二章 本研究の立場

本研究では標題にあるように土質化学の立場から止水技術の改良，開発を行うものである。ここで用いる土質化学の概念は喜田が提起した²ものであり，現在は必ずしも広く受け入れられているものではない。喜田によれば，土質化学とは“土の物理的・力学的諸性質を解明，改善するため，土の鉱物学的・コロイド学的組成，化学的成分，界面化学的性質，および化学的諸反応を研究する科学”とされる。筆者はこの概念をほぼ踏襲するものであるが，これを少し修正し次のような概念を与えたい。

“土質化学とは添加材を含む土の鉱物学的・コロイド学的・化学的・微生物学的な組成およびこれらによって決まる界面化学的性質と土中の化学反応を究明することにより土の工学的性質の解析・改良を図る学問分野である。”

この概念を模式的に下に示す。



一般に土の工学的性質を論じる場合，その組成として土粒子，水，空気を考え，また土の構造として粒度構成，骨格構造（粒子配列），水の存在状態を考え，これらによって透水，圧密，せん断などを解析している。しかし，土粒子といわれるものも実際には単に鉱物粒子のみならず，コロイド粒子や化学的結合物質などを含み，これらが土の工学的性質に重要な役割を果たしていることが広く認識されてきている。^{3,4}また，水についても様々なイオンや塩類あるいは有機物を含み，これらが土のコンシステンシーなどに大きな影響を及ぼすことも知られつつある⁵。さらに，土を添加材によって改良する場合には，土中で生じるもろもろの反応，特に化学反応を無視することは出来ない。このような実態を踏まえて提案されたのが土質化学の概念である。

なお，同様な立場から土質力学を体系化する試みが山内⁶らによってなされており，図-2.1のように土の物理化学を土質力学のなかに位置づけている。ここでいう土の物理化学は著者のいう土質化学とほぼ同義である。近年，このような立場からの土質工学へのアプローチが活発になり，土質工学会誌“土と基礎”では土の物理化学に関する特集号⁷が発行され，さらに土質工学への化学の応用についての成書も刊行された。⁸しかし，土の物理化学を地盤改良などの施工技術の開発に応用した例は多くはなく，本格的な展開は今後の課題⁹として残されている。

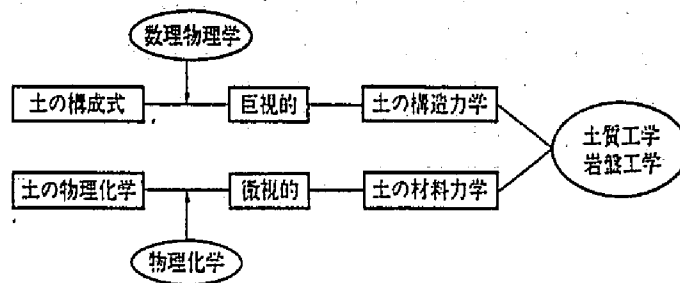


図-2.1 土質力学の二つの側面

ところで、土中の化学反応としては酸化・還元、吸着・脱着、イオン交換、溶解・析出、溶脱・集積、分解・合成、重合・解重合・架橋、発熱・吸熱などが含まれる。本研究のうち、安定液に関するものでは、吸着、架橋、分解などの反応が、また薬液注入工法に関するものでは、重合、発熱などの反応が問題解決に関連すると思われる。

第二部 地中連続壁工法における逸泥防止用安定液の開発

第一章 地中連続壁工法における安定液と逸泥

1. はじめに

第一部の第一章で述べたように本研究では地中連続壁工法における逸泥の防止と薬液注入工法における効果の推定に関する研究成果を述べる。本章では地中連続壁工法の概要を紹介するとともに、本工法に不可欠な安定液の機能を明らかにする。さらに、安定液が周辺の地盤に過剰に浸透するいわゆる逸泥現象について、その発生原因と従来の防止方法を述べる。

2. 地中連続壁工法¹⁰

地中連続壁工法は昭和30年代の半ばにヨーロッパから導入された技術であり、1960年代に無音・無振動の地下工法として広く普及し、現在では滞水性地盤の止水技術の代表的なものとなっている。我が国における地中連続壁工法による施工実績については集計されたものがないが、筆者の所属する(株)大林組では1980年12月現在約200万 m^2 に及び、年間10-20万 m^2 の割合で施工されている。図-1.1に(株)大林組の本工法の施工実績を示す。

この工法の用途は表-1.1に示すように多岐に及んでおり、特にビルの地下室の側壁、地下タンクの周壁、地下街、地下鉄の壁などにおいては重要な役割を果たす。これらの適用例について地下部分の概略図を図-1.2に示す。

次に、本工法の施工手順を図-1.3に示す。まず、掘削溝に安定液を充填しつつ、掘削機によって所定の深さまで掘削する。この深さは最大100mにも及ぶ。その後、鉄筋籠を挿入し、コンクリートを打設し単位長さのパネルを構築する。この作業をくりかえすことにより、地中に連続した鉄筋コンクリートの壁を造成する。この一連の作業において、掘削溝には安定液と呼ばれる泥水が充填され、溝壁面の崩壊を防止している。このため地中連続壁工法のことを泥水掘削工法あるいは安定液掘削工法と呼ぶことがある。掘削の方式にはバケット式のものとドリルあるいはカッターによる方式のものがあり、後者では安定液を循環させつつ掘削する。この工法で用いられる安定液は工法開発の初期には、それまでに長い経験と豊富な実績を有していた石油ボーリングの分野で開発されていた泥水技術¹¹を参考に調合・管理が行われていた。ところが、地中連続壁工法と石油ボーリングとでは対象とする土質、掘削深さ、掘削断面の形状、掘削方式など多くの点で

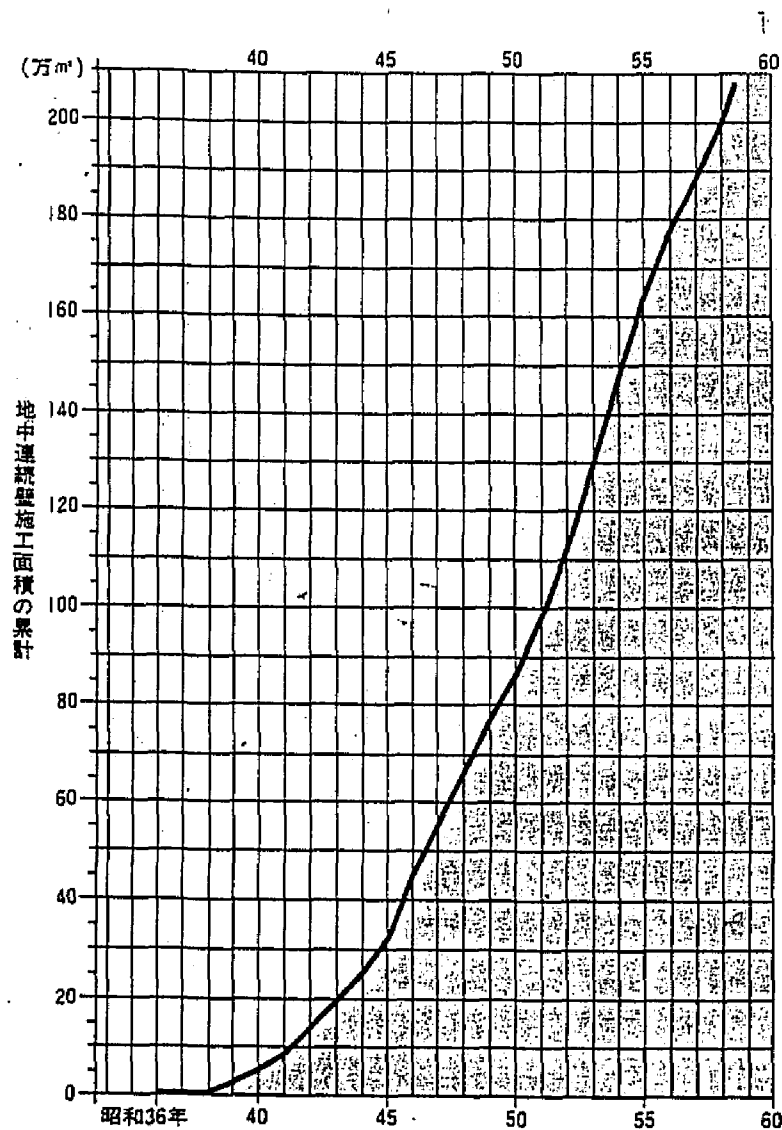
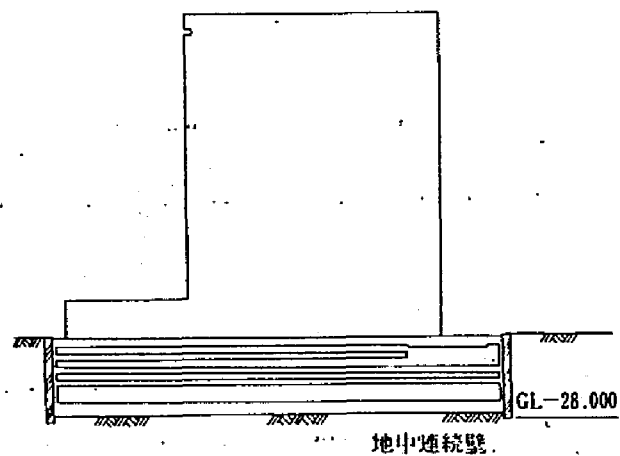


図-1.1 (株)大林組の地中連続壁工法の施工実績

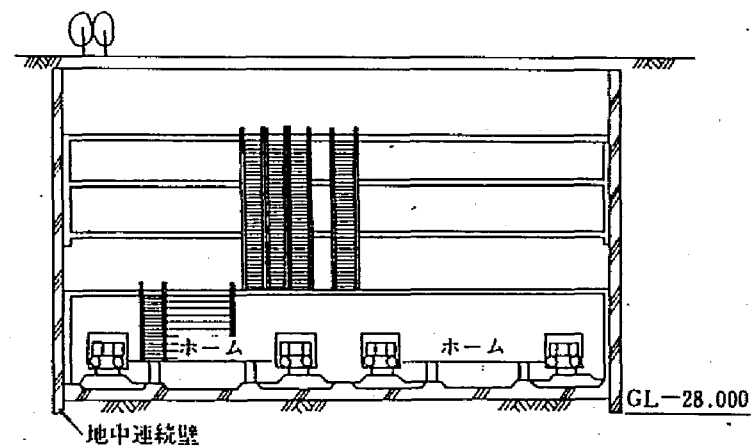
表-1.1 地中連続壁の利用例

分 類		利 用 例	
構造本体利用	基礎	一般建築物基礎、橋りょう基礎、煙突基礎、タンク基礎、高炉基礎、サイロ基礎、発電所基礎など	
	壁体	土水圧を支持する壁	単独壁利用 一般建築物、地下タンク、立坑、ピット、共同溝、ポンプ場、処理場、護岸、ドック、地下鉄、地下街、地下駅、地下駐車場 合成壁利用 取水口、放水口、地中り防止ぐいなど
		土水圧を支持しない壁	地下ダム、止水壁、通水壁、震動防止壁、地盤の液状化防止など
仮設利用	土水圧を支持する壁	山留め	
	土水圧を支持しない壁	止水壁	

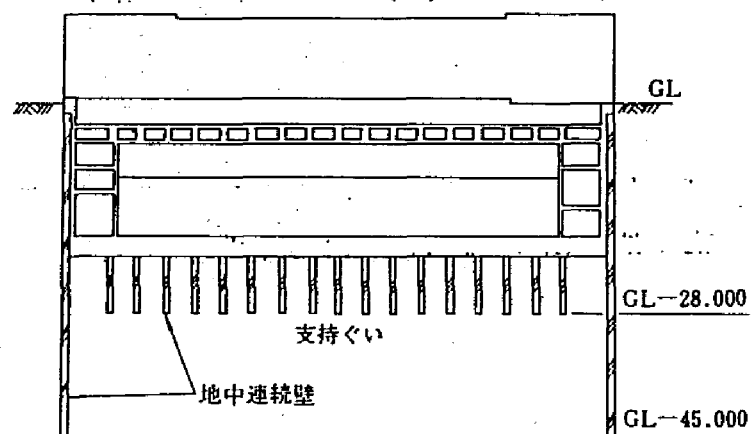
(1) 高層ビルの地下断面図



(2) 地下駅の断面図



(3) 浄水場断面図



(4) 地下タンク断面図

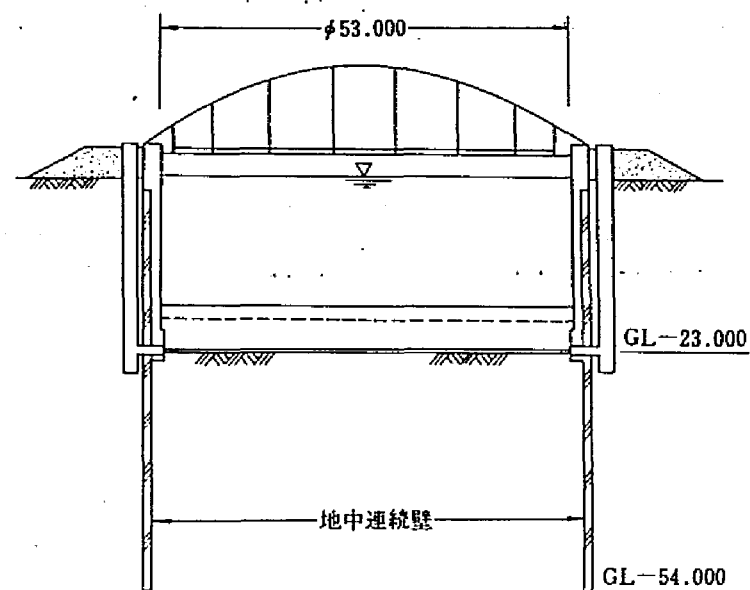


図-1.2 地中連続壁の利用概念図

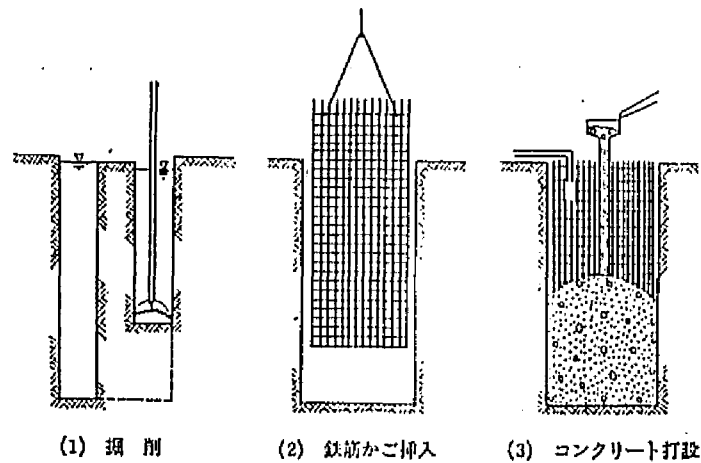


図-1.3 地中連続壁工法の施工手順

違いがあり、地中連続壁工法に独自の安定液技術が必要とされた。本工法の安定液に関する技術開発は各方面で精力的に行われ、とくに喜田は膨大な成果を発表している。¹²

3. 安定液の機能¹³

安定液の機能には次のようなものがある。

- ① 掘削壁面(溝壁)の安定
- ② 掘削土砂の運搬・保持
- ③ 周辺地盤の改良
- ④ 掘削ビットの過熱防止
- ⑤ コンクリート打設の際の置換体

これらのうち特に重要な機能は①の壁面安定である。壁面安定の機構は完全に解明されてはいないが、表-1.2に示す要素が関与しているとされている。¹⁴なかでも安定液によって溝壁面に形成される泥壁あるいは泥膜(マッドケーキ)が不可欠の要素である。泥壁は図-1.4に示すように、泥膜(マッドケーキ)と浸透沈積層とで構成される。この泥膜(マッドケーキ)を介して安定液の液圧が有効に溝壁面に作用することにより、溝壁面の力学的なバランスが保たれる。一般の地山では泥膜は1-10mm程度であり、その形成は瞬間的である。また、その透水係数は 10^{-6} - 10^{-8} cm/secといわれる。¹⁵

ところが、地盤の透水係数が高い砂れき地盤などでは溝壁面に泥膜が形成されず安定液が地盤に際限なく浸透し、溝内の液圧を保持することが困難になり溝壁面の崩壊を招くことがあり、これを逸泥現象と呼んでいる。逸泥の規模は大きいものでは $10\text{m}^3/\text{Hr}$ 以上に及ぶこともあり、安定液の消耗による経済的な損失も無視できない。さらに、浸透した安定液による地下水の汚染が広範囲に及ぶこともあり、環境保全のためにも逸泥の防止が不可欠である。

表-1.2 掘削壁面の安定に關与する要因

主要部分	性質・機能	安定に關する要素	安定作用	備考
フィルターケーキ (泥 壁)	(a) 膜としての機能	(1) 不透水膜 (物理的)	安定液と地下水を遮断し、液圧を地山に作用させる。	
		(2) 半透膜 (物理化学的)	膜特性と液濃度による起電力で電気浸透類似の作用が生ずる。浸透圧の原因となる。	Nash (1963) Verder (1961) Franke (1963) 沢川・吉田 (1967)
	(b) 障壁としての機能	(1) プラスター効果	壁面の被覆で土粒子の崩落を防ぐ。	Verder (1963)
		(2) 拘束効果	地山の変位を少なくする。壁面強度を増す。	Verder (1963)
安定液	(a) 液 密 度	(1) 安定液自体の密度 (調整時密度)	安定液による静水圧の主因	
		(2) トレンチ内での安定液密度 (掘削中細粒土の混入)	細粒土の混入によって10~20%の密度増加が実測されている。	Morgenstern (1965)
	(b) 受 動 抵 抗	安定液のせん断抵抗に原因する受動抵抗	剛で粗な地山にはさされた完全塑性体としての安定液が受動抵抗を發揮する。	Morgenstern (1963) Elson (1968)
	(c) 浸 透 差	電気浸透に相当する浸透作用を起こさせる起電力の原因	浸透圧発生原因	
地 山	(a) 地 下 水 位	地山からの作用力の主因	地下水の相対水位が安定に大きい影響を及ぼす。	
	(b) 地盤土の強度と密度	地山からの作用力の大きさに関係	主動土圧の大きさを左右する。	
	(c) ア ー チ 作 用	地山からの作用力を軽減	主動土圧の軽減	Plaskowski (1960) Shneebli (1964)
	(d) ベントナイトの混入した地山のせん断抵抗	安定液で飽和された地山のせん断抵抗の増加	ダイレイタンスに伴う負圧作用による。	Elson (1968)

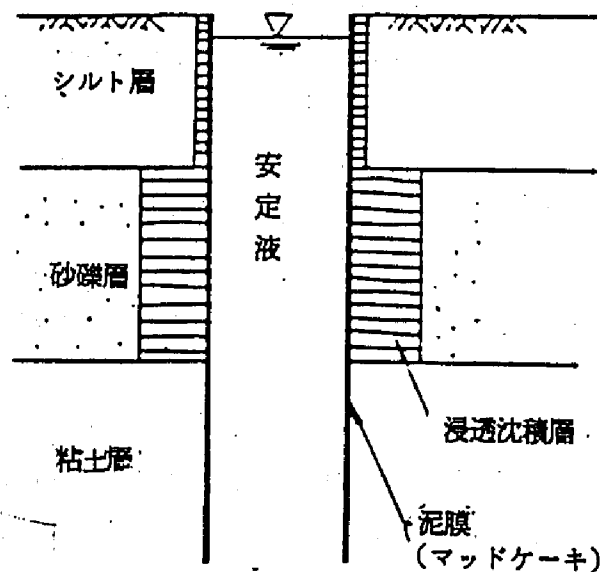


図-1.4 掘削壁面の模式図

4. 安定液の調合と管理¹⁸

このように重要な機能を有する安定液は従来、石油掘削ボ-リングの分野と同様にベントナイト、分散剤、増粘剤などを水に懸濁・溶解させて調合したベントナイト安定液が使用されていた。最近、著者らはベントナイト安定液と同等あるいはそれ以上の性能を示すポリマー安定液¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹を開発・実用化している。この安定液では主材としてCMC(カルボキシ・メチル・セルロース)などの水溶性高分子を用い、これを水に0.5%前後の濃度で溶解している。これらの安定液は表-1.3に示すような特徴を有し施工条件によって使い分けられている。

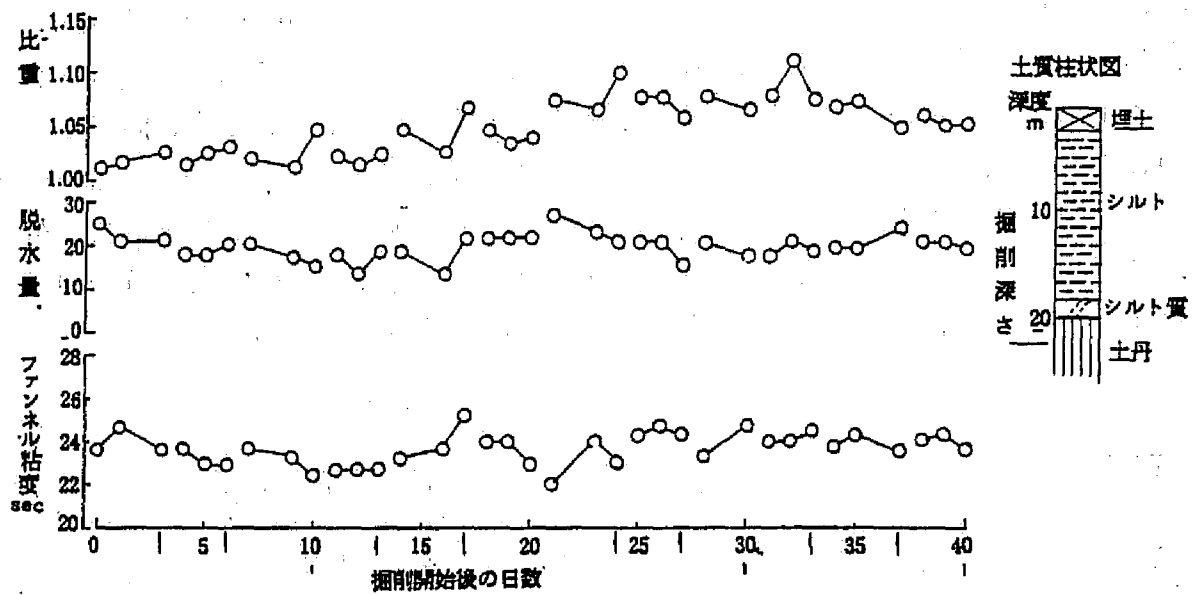
表-1.3 安定液の特性比較

種別	ベントナイト安定液	ポリマー安定液
材質	無機物	有機物
機能	膨潤したベントナイト粒子が地盤中に浸透するとともに、掘削壁面に不透水性の泥膜を形成	水溶性高分子(ポリマー)が粘土と複合体を形成し、複合体がベントナイト粒子と同様に機能
水質の影響	塩分の多い水ではベントナイトの膨潤が抑制され、凝縮する	影響を受けにくい
主に劣化因子	セメント成分、塩分	土中の微生物(細菌など)
スライム処理	スライムの沈降速度が遅く、堆積物がルーズになり易い	スライムの沈降が早い、沈降は全量沈降するまで続く
砂地盤の調合例	ベントナイト 6% CMC 0.1% 分散剤 0.2% 逸泥防止剤 0.5%	ポリマー 0.5~1% 逸泥防止剤 0.5%

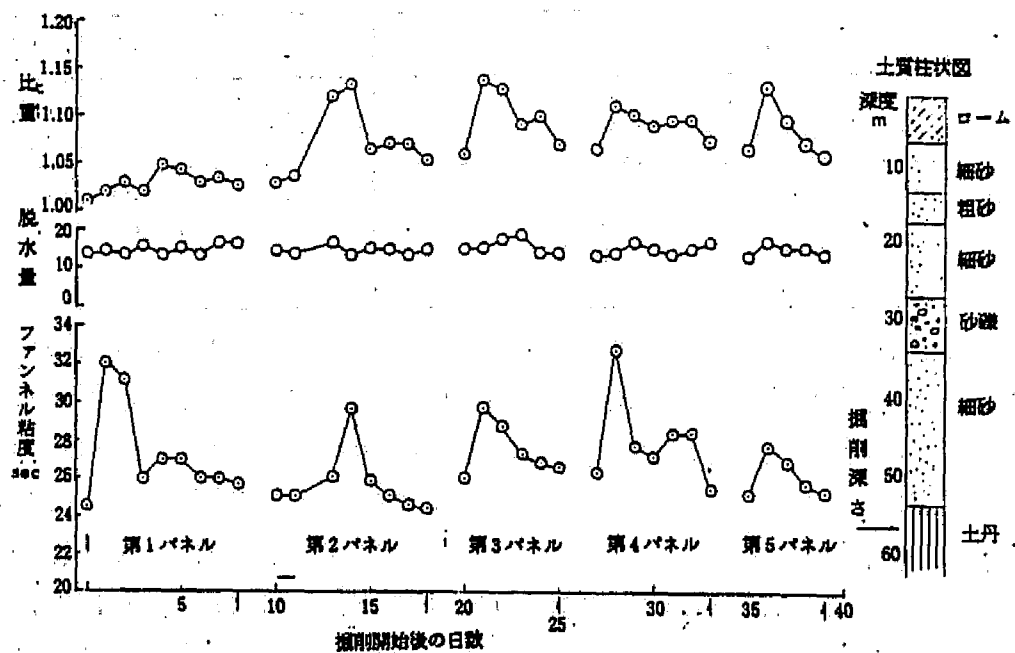
安定液は使用中に掘削土や地下水の混入により、またコンクリート打設時にはセメント成分の混入により、さらには微生物の増殖²⁰により性能が低下する。このため、安定液が所定の性能を示すように品質管理がおこなわれる。その項目には粘度、比重、造壁性などがある。造壁性とは、前に述べた溝壁面に泥膜を作る性質であり、一般には安定液を加圧ろ過して得られるろ過水の量によって評価される。通常安定液の品質の範囲は粘度が10-50CP、比重が1.00-1.20、造壁性が50cc以下(API規格のろ過試験機によるろ過液量、3Kg/cm²、30min)である。掘削中の安定液の性状変化の例を図-1.5²¹に示す。

5. 逸泥の原因と防止対策²²

逸泥とは安定液が地盤内の間隙に際限なく浸透する現象であり、次のような場合に発生する。



(バケット式掘削、ポリマー安定液使用、矢印はコンクリート打設)



(パネル式掘削、ポリマー安定液使用、矢印はスライム処理)

図-1.5 使用中の安定液の性状変化

- ① 粗砂や砂れきのように地盤の透水係数が高い場合
- ② 地盤に亀裂がある場合
- ③ 地盤に空洞がある場合
- ④ 周辺で地下水をくみあげている場合
- ⑤ 地下水が流れている場合
- ⑥ 地下水位が低い場合

これらのうち、我が国の沖積層あるいは洪積層の掘削で一般的なのは①のケースであり、①と④あるいは⑤の条件が重なった場合には大規模な逸泥が発生する。これまでの実績を整理して逸泥規模と地盤の透水係数の関係を図-1.6²³⁾に示した。この結果によれば、透水係数が 10^{-2} cm/secを越えると逸泥規模が著しく

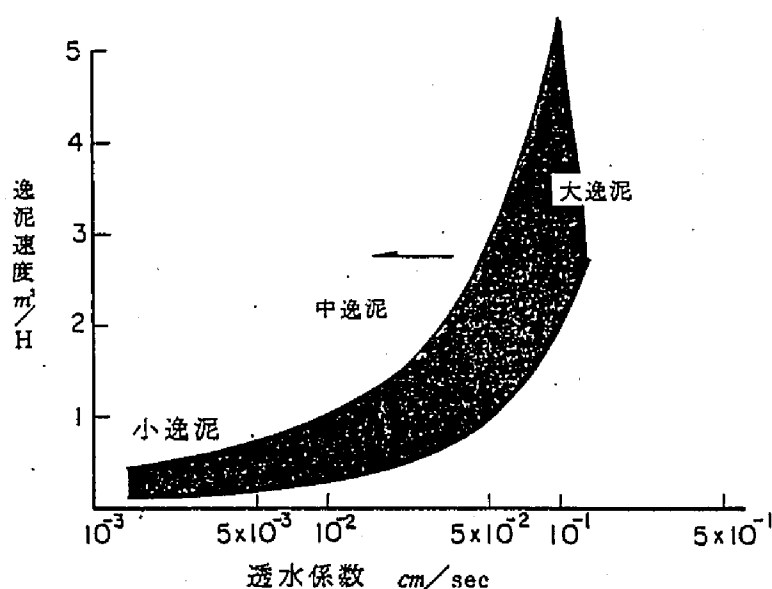


図-1.6 逸泥と地盤の透水係数

なる。このような地盤における逸泥防止の基本手法を表-1.4に示す。ここに示すように大別して四つの手法があり、これらは逸泥規模、逸泥の発生位置、掘削機、コストなどを考慮して採用されている。逸泥防止材による方法は実施例が多く材料に関する研究²⁴⁾²⁵⁾も進んでいるが、適用範囲が中小規模の逸泥に限定される。安定液をゲル化させる方法は比較的簡便であるが安定液の劣化が著しく再使用が困難なため経済的な方法とはいえず、応急処置に限定される。地盤改良による方法は工期、コストの面で問題を残す。特に、透水係数が 10^{-1} cm/secをこえる地盤における大規模な逸泥に対し有効かつ安価、簡便な防止対策の確立が望まれている。そこで、著者は地中における安定液の浸透機構を解明するとともに、ポリマー安定液を研究・実用化した実績を踏まえ、重合の程度や架橋によって性能、特に流動性状を幅広く制御しうる水溶性高分子を用いた逸泥防止方法

について基礎的に研究した。そして、これらの成果を大規模な逸泥が予想された工事現場へ適用しその有効性を確認した。

表-1.4 逸泥-防止の基本手法

手 法	内 容	適 用 範 囲
逸泥防止材の添加	繊維(糸くず,紙くず) 繊維状粘土 粒状物(オガクズ,綿の実など) 板状物(雲母,セロファンなど)	中小規模の逸泥に有効
安定液のゲル化	セメント,石灰の添加	安定液が劣化するので 応急処置に限定
地盤改良	逸泥層への薬液注入 逸泥層を良質土により置換	逸泥層が限定される場 合に有効 表層での逸泥に有効

なお、逸泥防止は地中連続壁工法と同様に安定液(泥水)を用いて横穴を掘削する泥水シールド工法や円形断面の縦穴を掘削するアースドリル工法やリバースサーキュレーション工法においても重要な課題であり²⁶⁾、地中連続壁工法と類似の対策が講じられているが十分とはいえない状態にある。したがって、本研究の成果はこれらの工法へも適用が可能と考えられる。

第二章 地中における安定液の浸透^{27,28,29}

1. はじめに

地中連続壁工法の課題の一つに砂れき地盤のような透水係数の高い地盤における逸泥の防止がある。この課題は地中連続壁工法と同様に安定液(泥水)を用いるシールド工法である泥水シールド工法においても重要である。逸泥防止材を用いた方法についてはすでに、その効果発現のメカニズムを室内実験により明らかにするとともに、工事現場への適用結果について報告している。^{24,25}ここでは、安定液の流動特性に着目して地中における安定液の浸透挙動を解明することにより、従来経験的に有効性が確認されている安定液のゲル化による方法の根拠を明らかにする。更に、ポリマー-安定液を用いた新しい逸泥防止方法の可能性について考察する。

2. 実験方法

2.1 供試材料

ベントナイト：山形県産の250メッシュのものをを用い、安定液にはこれを6-12%(W/V)の濃度となるように懸濁させた。

陶土：岐阜県産のカオリナイト、ハロイサイトを主要粘土鉱物とする粉末粘土を用い、その濃度は40%(W/V)までとした。

シルト：東京沖積層のシルト層から採取した粘性土を湿潤状態で使用した。これらの材料の粒径分布を図-2.1に示す。

ポリマー：CMC(カルボキシメチルセルロース、以下、OP-4と呼ぶ)およびGuar Gum(以下、OP-7と呼ぶ)の0.5-1.0%水溶液を使用した。

これらの材料は家庭用のミキサーで混練し、一夜以上放置した後に実験に供した。

ガラス玉：地盤のモデルとして考え、粒径のそろった(0.2mm, 0.5mm, 1.0mm)ものを用いた。その透水係数はそれぞれ、 8.2×10^{-2} cm/sec, 1.5×10^{-1} cm/sec, 1.1×10^0 cm/secである。

2.2 浸透実験装置

図-2.2に概要を示す。この装置では、安定液に加圧して浸透させる。その際の圧力は 0.2 Kg/cm^2 と設定した。

2.3 測定項目と方法

安定液の流動特性：ファンネル粘度計(API規格)およびB型粘度計(東京計器製)によった。前者では粘度を流下時間(秒)で、後者ではロータ-回転数が30rpmの時の粘度で表示する。また、降伏値はB型粘度計による流動曲線から求めた。

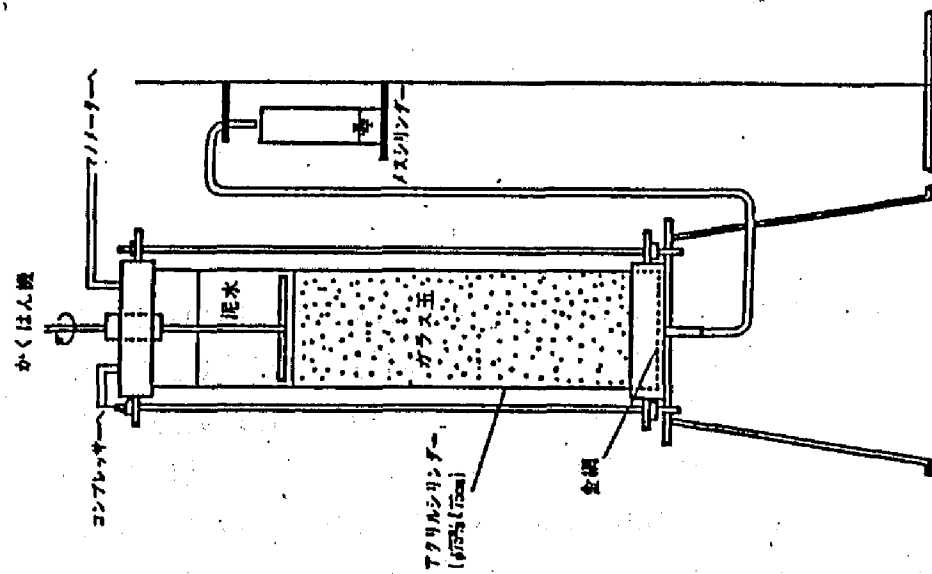


図-2.2 試験装置

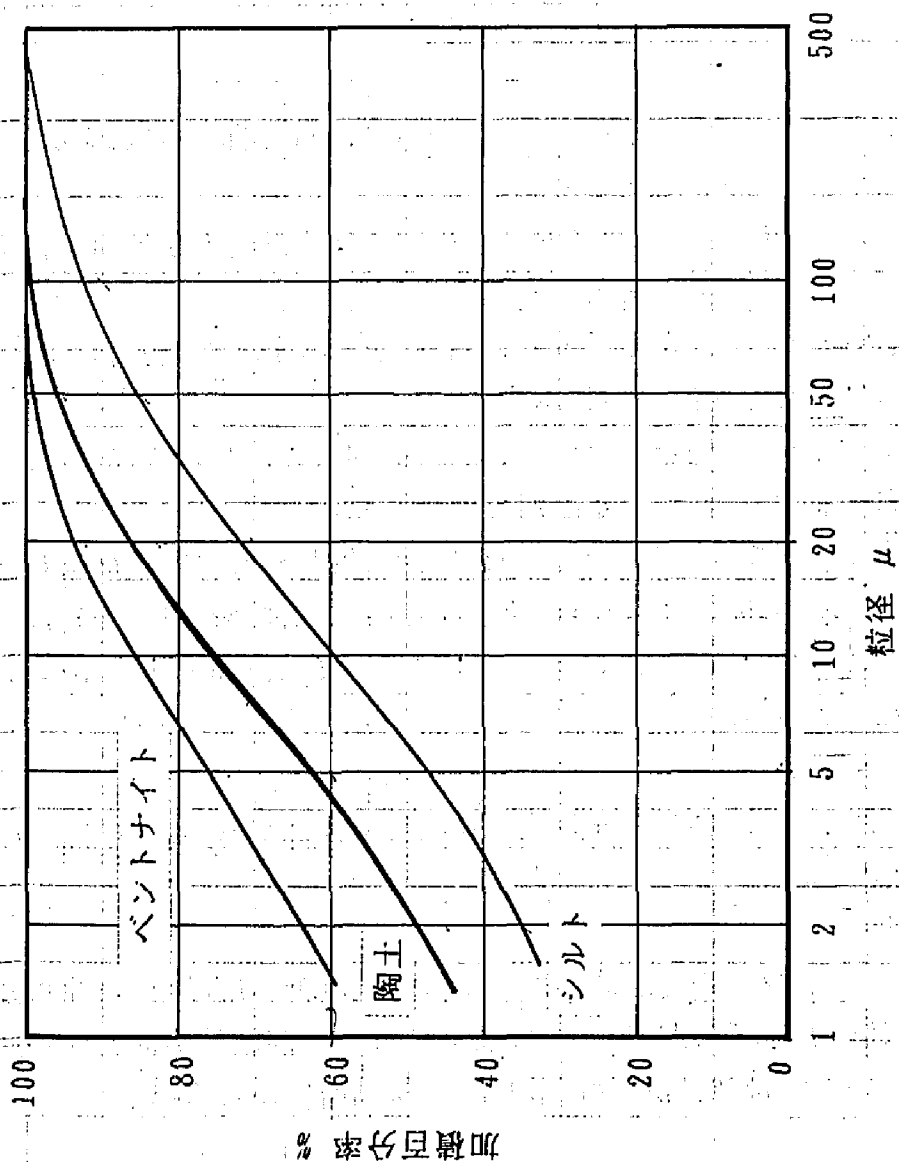


図-2.1 試料土の粒径分布

安定液の浸透距離：図-2.2に示す装置にガラス玉を充填し，その上に安定液を静かに入れ，加圧後の浸透距離を経時的に測定した。その際，安定液に着色し外から浸透距離が観察しやすいようにした。また，排水量についても経時的に測定した。

間隙水圧：地盤モデルの各所に水圧測定用のチップをセットし，これをマンノメーターにつなぎ間隙水圧を測定した。

3. 実験結果

3.1 安定液の流動特性

図-2.3に流動曲線の例を示す。ズリ応力とズリ速度(ここではロータ回転数)が直線となりニュートン流を示すものと，直線からずれてビンガム流体的な挙動を示すものが見られる。

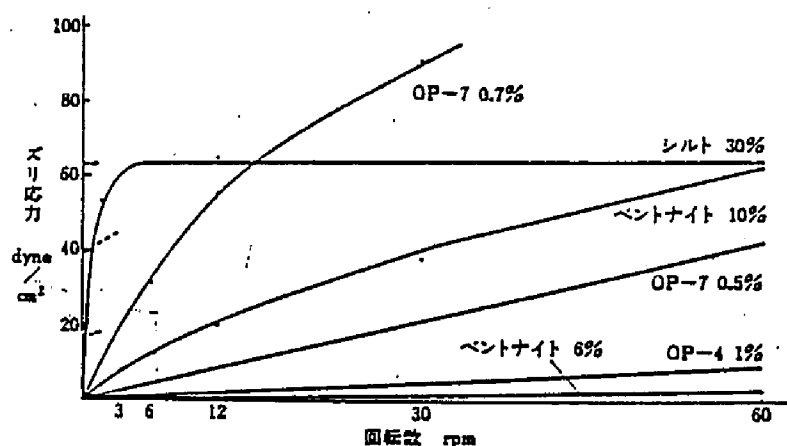


図-2.3 安定液の流動曲線

示すものが見られる。ビンガム流体的な挙動を示すものについては直線部分をズリ応力軸に延長した点のズリ応力を求め，これを降伏値とした。各安定液(泥水)の流動特性値を表-2.1に示す。いずれの安定液も濃度が高くなるにつれて粘度が高く，降伏値が発生するようになる。特にポリマ-安定液(OP-7)およびシルト泥水では降伏値の発生が著しい。また，ポリマ-安定液(OP-4)は高濃度でもニュートン流体として扱いうる。

図-2.4にはファンネル粘度とB型粘度計による粘度との関係を示す。図示したように，同一のファンネル粘度でもB型粘度は著しく異なる。

表-2.1 安定液の流動特性値

泥 水	ファンネル粘度 sec	粘度 cP	降伏値 dyne/cm ²
ベントナイト	6%	27.0	12
	8%	40.7	118
	10%	69.0	255
	12%	—	2800
ベントナイト アスベスト	6% 12%	54.0	140
OP-4	1%	40.1	42.4
OP-7	0.5%	38.5	220
	0.7%	72.0	1080
	1%	—	2520
シルト	15%	24.0	59
	20%	25.6	140
	25%	28.0	275
	35%	46.5	1050
陶 土	20%	19.5	66
	30%	20	165

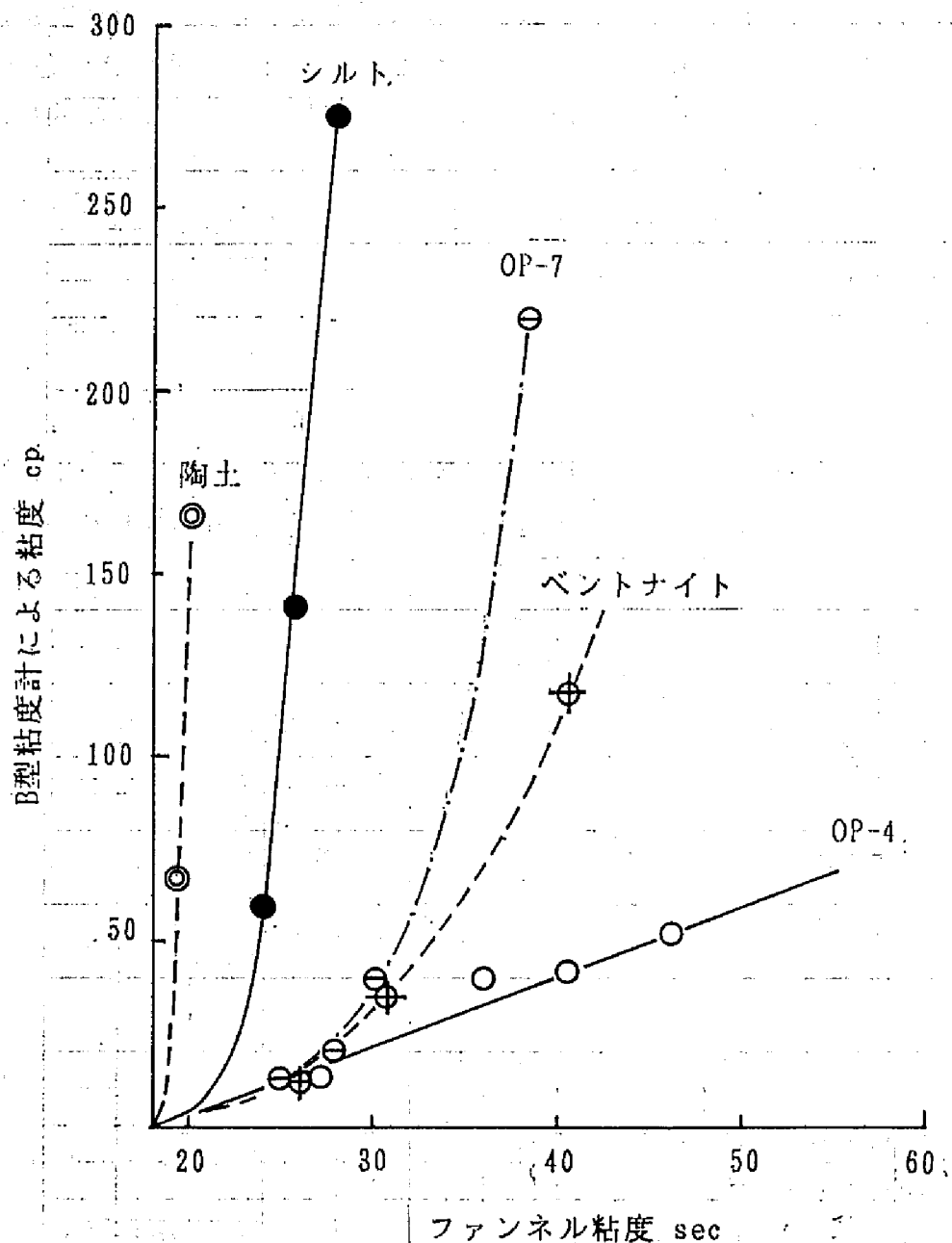


図-2.4 ファンネル粘度と粘度の関係

これは、双方の測定の際のズリ速度が異なるために生じるものと思われる。すなわち、前者では 500sec^{-1} 前後のズリ速度に対し、後者では 50sec^{-1} 前後の条件で測定している。このため、B型粘度には降伏値の影響がより顕著に表れ、したがって降伏値を有するものでは、B型粘度でより大きな値を示すようになる。シルトや陶土では粘度が低くても降伏値を有するためB型粘度が高いのにたいし、ポリマ-(OP-4)では粘度が高くても降伏値が見られないためB型粘度が高くない。

3.2 安定液の浸透特性

図-2.5に浸透距離の経時変化を示す。いずれの安定液の場合も加圧の初期に急速に浸透し、以後は浸透速度が低下する。ベントナイトやシルトの粒子系の安定

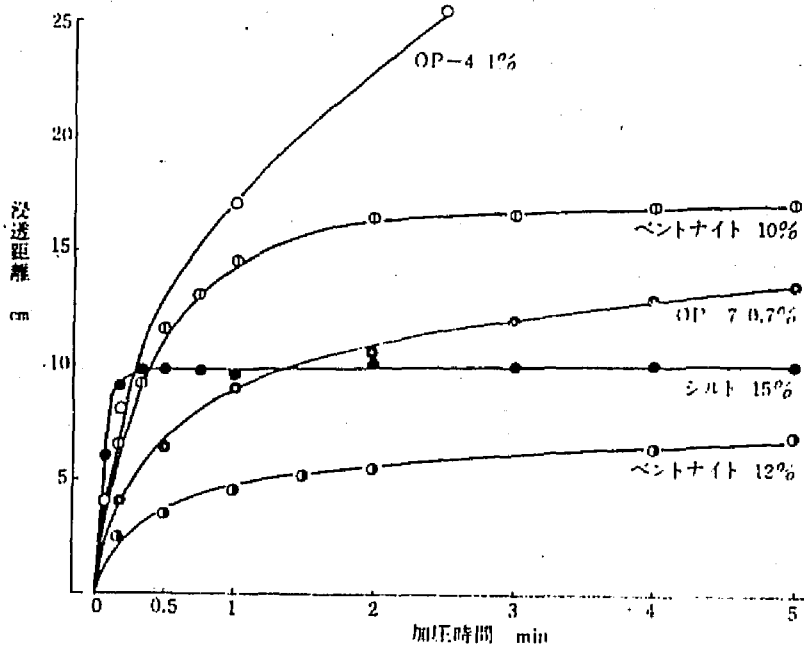


図-2.5 浸透曲線の例(0.5mmガラス玉)

液では加圧5分後には浸透がほぼ停止する。ポリマー安定液ではその後もゆっくりと浸透範囲が拡大する。前者では地盤モデルと安定液の界面には粒子によるろ膜(マッドケーキ)が形成されたことを示している。一方、ポリマー安定液では浸透範囲が徐々に止水化されていることを示唆している。ただし、OP-4では浸透範囲の拡大が比較的速く、逸泥は防止できない。

次に、図-2.6に浸透距離と地盤モデルの透水係数との関係を示す。ポリマー安定液では両者は直線的な関係を示し、この場合の浸透はDarcyの法則に従っていることを示している。一方、粒子系の安定液では直線にならず、ある透水係数をこえると著しく浸透するこれは、透水係数

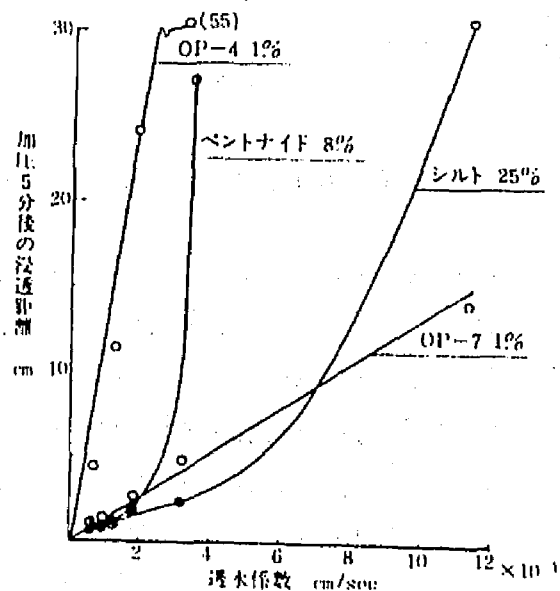


図-2.6 浸透距離と透水係数の関係

が低い範囲では含有する粒子による目づまりが有効に作用して浸透が抑制されていることを示している。浸透距離が急激に立ち上がる点はベントナイトよりシルトのほうが高い透水係数の側にあり、後者がより粗粒であることと対応している。

また、浸透距離と排水量は直線関係となり、浸透に伴い間隙水を置換したと仮定して求めた排水量と実測値はほぼ一致する。これは、地盤モデル中の安定液の希釈や拡散が無視しうることを示している。

3.3 間隙水圧

地盤モデル内のある点の間隙水圧の変化を図-2.7に示す。浸透が急激に進み逸泥が防止できないベントナイト6%の場合、間隙水圧は上昇したままで低下することがない。地盤モデル表面にマッドケーキが形成され浸透範囲が拡大しないシルト20%の場合、一時的に間隙水圧が増大するがマッドケーキの形成に伴い急激に低下する。浸透範囲の全体を止水化するタイプのポリマー(OP-7)の場合は両者

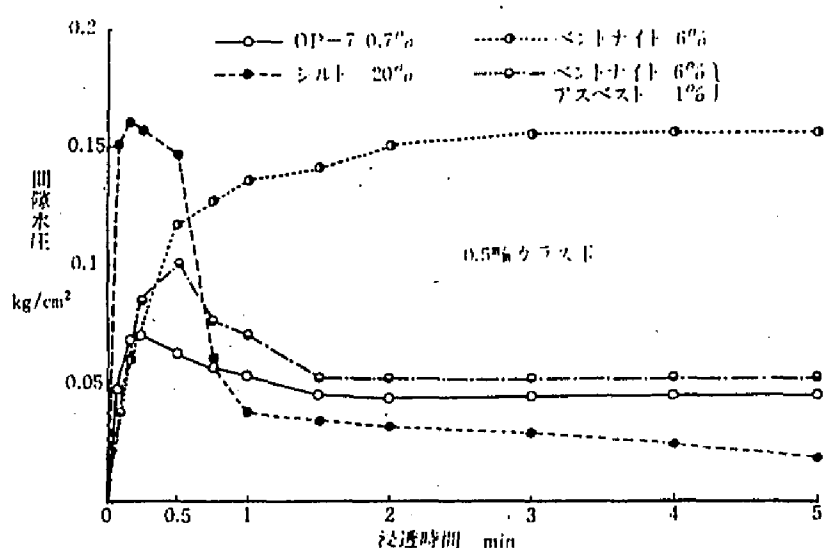


図-2.7 間隙水圧の変化(地盤内 5cm)

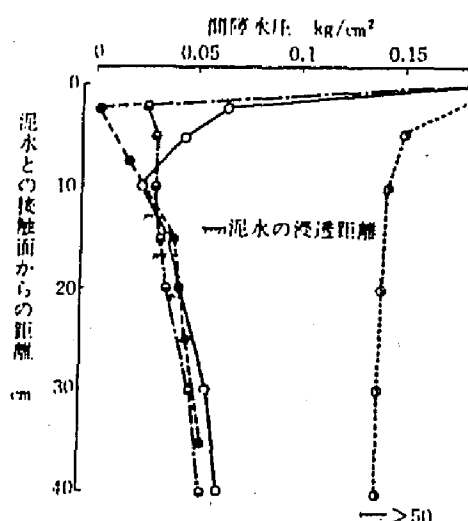


図-2.8 間隙水圧の分布(加圧5min)

の中間的な挙動を示す。いずれにせよ、逸泥防止が可能な場合には間隙水圧が一旦上昇した後に低下し、水圧低下が開始する時間は加圧後30秒前後であり、この時間がマッドケーキの形成あるいは地盤の止水化に要する時間と考えられる。

次に、加圧5分後の間隙水圧の分布を図-2.8に示す。浸透の著しい場合には、地盤モデルの深くまで間隙水圧が高く、浸透範囲が拡大しない場合には、地盤内の間隙水圧は低い。すなわち、加えられた圧力が地盤モデルの表面のマッドケーキあるいは止水ゾーンを介して地盤に有効に伝達されているといえる。なお、間隙水圧の最小値は粒子系の安定液では地盤モデルの表面近くに見られ、溶液系(ポ

リマ-系)の安定液では表面からかなり入った所に見られる。これは、粒子系の安定液では表面のマッドケーキにより、溶液系の安定液では浸透による止水ゾーンにより浸透の進行を防止していることを示している。

4. 考察

4.1 安定液の浸透距離と流動特性の関係

各種の安定液について浸透実験を行った結果、浸透範囲を拡大させない方法には二つの方法があることが判った。特にポリマ-安定液では目づめ作用によるマッドケーキの形成は期待できないものの、境界面の近くの地盤に止水ゾーンを形成することが可能であることが判明した。そこで、安定液の流動特性の制御による浸透範囲の拡大の防止の可能性について検討する。

ところで、粘性流体の細管内の流動に関して、ニュートン流体では(1)式に示すHagen-Poiseuilleの式が知られている。³⁰地盤内の安定液の浸透現象にこれが適用できないかと考え、先の浸透実験の結果を検討した。

$$\Delta P = 32v\ell\mu/gD^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ΔP : 損失圧力 g/cm^2

v : 平均流速 cm/sec

ℓ : 流動距離 cm

g : 重力加速度換算係数

D : 細管の直径 cm

μ : 流体の粘度 $g/cm \cdot sec$

(1)式を用いるにあたり、 ΔP は加えた圧力の $200g/cm^2$ 、 v を $0.02cm/sec$ 、 D をガラス玉粒子の間隙径($0.5mm$ ガラス玉: $0.18mm$, $1mm$ ガラス玉: $0.36mm$)とし、この場合の ℓ と μ の関係を計算した。

図-2.9は計算した曲線と実測値をプロットしたものである。 $0.5mm$ ガラス玉の場合、低粘度側では実測値は計算値から大きくずれ、この傾向はシルト系安定液などの粒子系安定液で顕著である。これらの安定液では懸濁粒子の目づまり現象が生じていることを示している。一方、 $1mm$ ガラス玉ではいずれの安定液でも実測値は計算値とよく一致し、この系では浸透距離が安定液の粘度に支配されていることを示す。

ところで、ビンガム流体の細管内の流動は次に示す(2)式に従うといわれる。³¹

$$\ell = PR/4\tau \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ℓ : 流動距離 cm

P : 圧力 $dyne/cm^2$

R : 細管の半径 cm

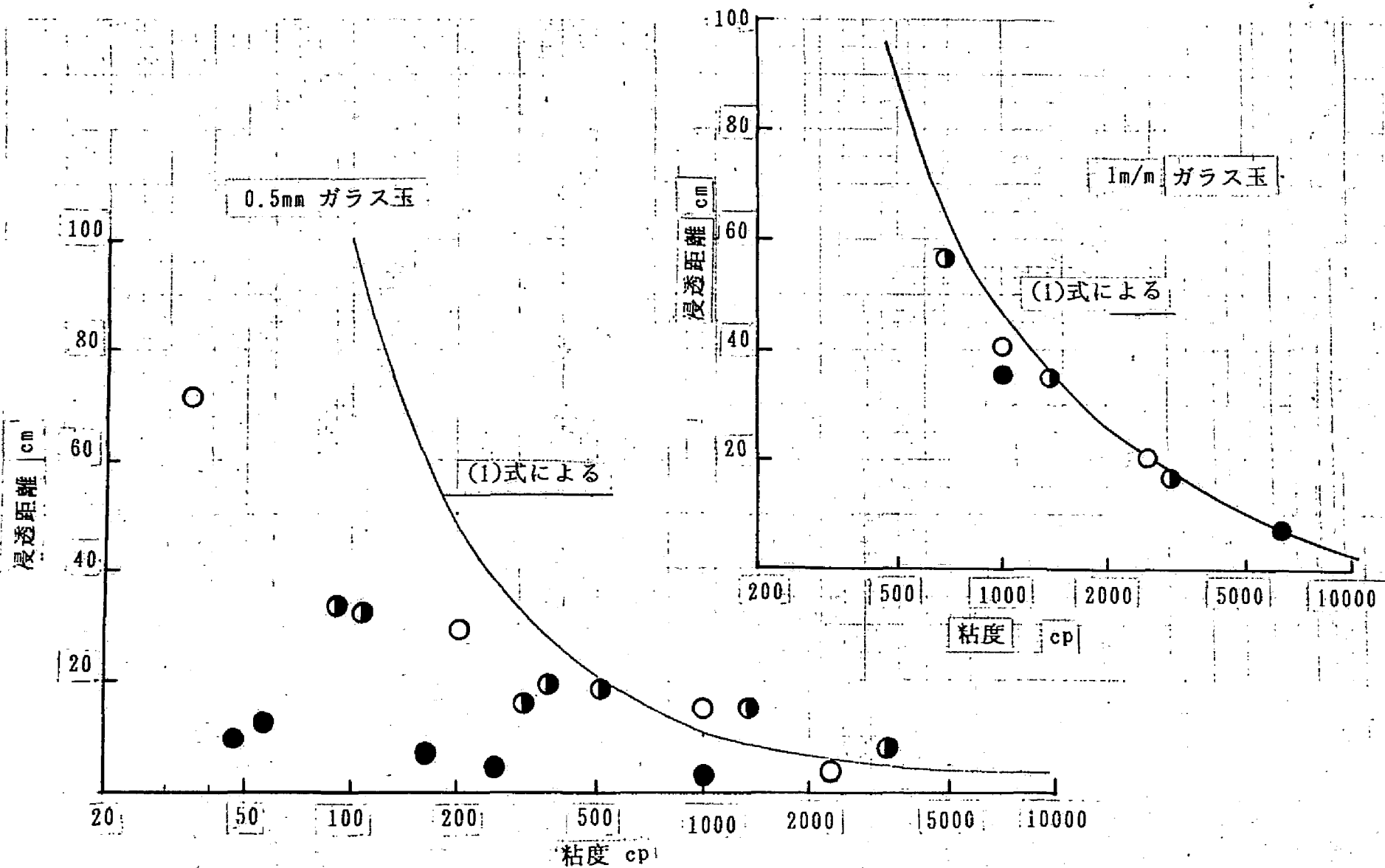


図-2.9 安定液の粘度と浸透距離

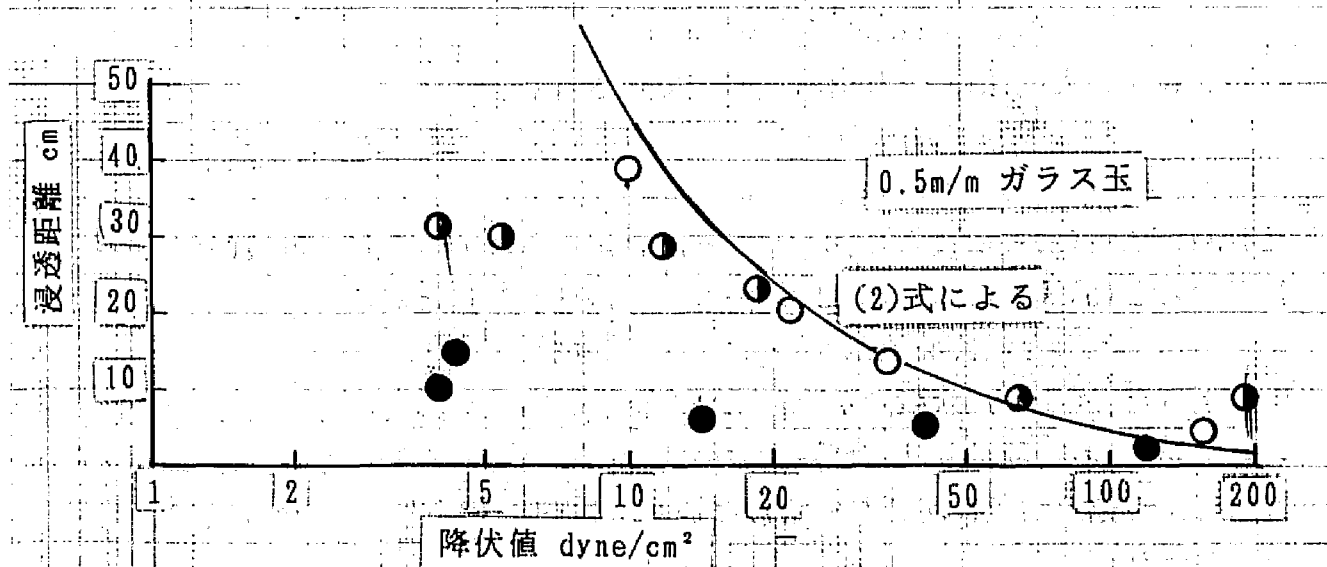
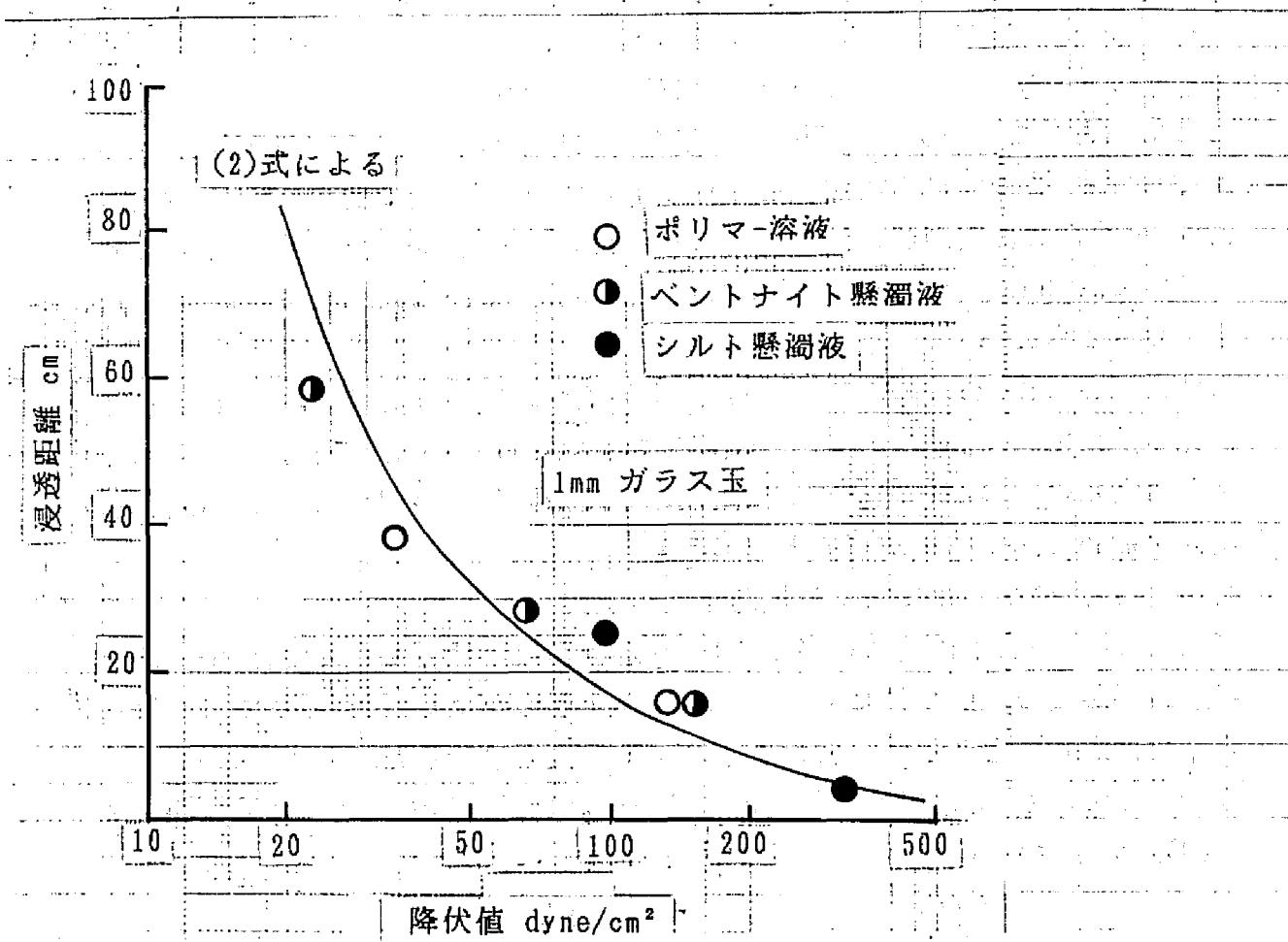


図-2.10 安定液の降伏値と浸透距離

τ : 流体の降伏値 dyne/cm²

ここで、 R としてガラス玉の間隙径の半分を用いて計算を行うと図-2.10の実線が得られる。この図にも実測値をプロットしているが、前の粘度の場合と同様に0.5mmの場合には実測値と計算値のズレが目立つが、1mmの場合にはかなりよく一致する。0.5mmガラス玉におけるズレは前述したような懸濁粒子の目づまりに由来すると考えられる。

さて、現在特に求められているのは透水係数が10⁰cm/sec前後の地盤における逸泥の防止である。したがって、1mmガラス玉で得られた結果が有効であり、このように透水係数の高い地盤では安定液の粘度や降伏値の制御により浸透範囲の拡大すなわち逸泥防止が可能と思われる。

4.2 安定液のゲル化による逸泥防止法の提案

砂れき地盤の透水係数に相当する10⁰cm/sec前後の地盤モデルでは、安定液の浸透距離がその流動特性に支配されることが明らかになった。そこで、地盤の透水係数に応じて必要な流動特性を予測する手法を検討した。

Hazenによると、透水係数と地盤の有効径 D_{10} (10%粒径)との関係は近似的に次の(3)式で示される。³²

$$k = CD_{10}^2 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (3)$$

ここに、 k : 透水係数 cm/sec

C : 比例定数 1/cm \cdot sec

D_{10} : Hazenの有効径 cm

また、粒子径と間隙径との関係は(4)式で示される。

$$R = 0.261D_{10} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4)$$

ここに、 R : 間隙の半径 cm

これらの式を(2)式に代入し、 C として一般に用いられている100、 P に200g/cm²を採用すると(5)式が得られる。これを図示すると図-2.11となる。

$$Q = 1300\sqrt{k/\tau} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (5)$$

図のように、地盤の透水係数が事前に判れば逸泥防止に必要な降伏値を設定することができる。同様な計算は安定液の粘度についてもすることができ、地盤調査結果から逸泥防止に必要な安定液の流動特性値を提案することができる。

5. おわりに

ガラス玉を用いた室内実験により、地盤内の安定液の浸透挙動を検討した。その結果、浸透範囲の拡大を防止する要因には、①懸濁粒子の目づまり ②安定液の流動特性があり、10⁰cm/sec前後の透水係数の地盤では安定液の流動特性を制御する方法が有効であることが明らかになった。安定液の流動特性は土砂分離

の面からも制約を受けるが、ここで得られた結果は逸泥防止を最優先すべき砂れき地盤の安定液の調合・管理を考える際に貴重なものとなる。

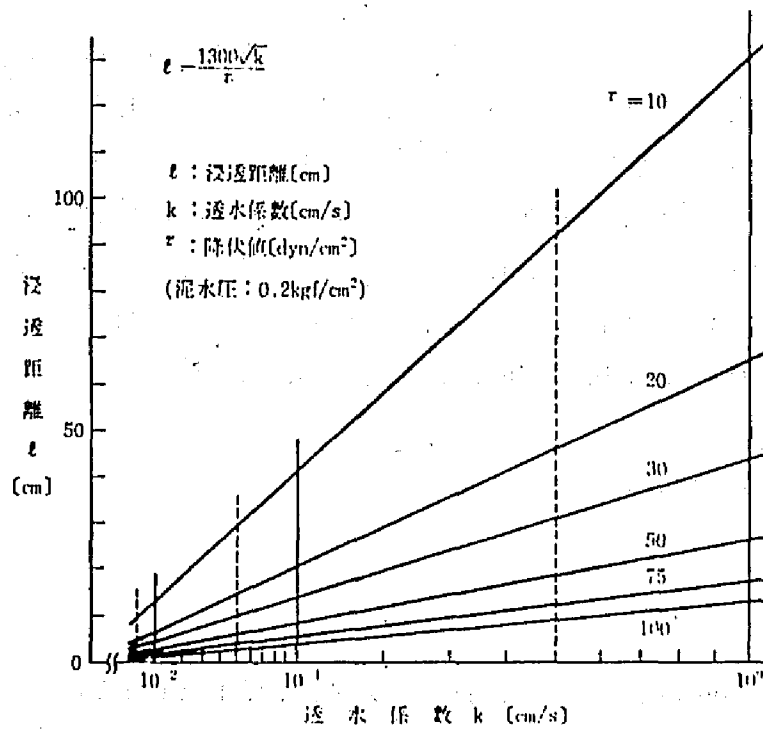


図-2.11 透水係数と浸透距離の試算例

第三章 逸泥防止用ポリマ-安定液の開発^{3,34}

1. はじめに

第二章におけるモデル地盤を用いた室内実験により、地盤内の安定液の浸透挙動は細管内の粘性流体の流動挙動と類似することが判明した。すなわち、安定液の浸透範囲は地盤の透水係数とその粘度あるいは降伏値などの流動特性に支配される。したがって、逸泥すなわち浸透範囲の際限のない拡大を防止するためには安定液の流動特性値を制御してやればよい。そこで、ベントナイト安定液に比べて性状を制御しやすいポリマ-安定液のうち特に架橋反応によって流動特性を広い範囲で調節しうるGuar Gum溶液に着目し、その性質および逸泥防止効果について検討した。

2. Guar Gum溶液の性質

2.1 実験方法

i) 供試材料

ポリマ-: Guar Gum(市販の粉末-100メッシュ, 文中, OP-7と呼ぶこともある)およびCMC(カルボキシメチルセルロース, 平均重合度500, エーテル化度0.6のもの, 文中, OP-4と呼ぶこともある)。それぞれの分子構造を図-3.1に示す。図示したように、Guar Gumはガラクトース、マンノースが枝状に重合したもので、ここで供試したものの平均分子量は200000前後である。

粘土: 陶土(粘土鉱物としてハロイサイトを主体とする)

掘削土: 東京低地の沖積層シルト

変質防止剤: PCMX(パラクロロメタキシレノール)

ii) 溶液の作成

ポリマ-は家庭用ミキサーによって0.1-0.7%の濃度になるように溶解し、一夜放置後、試験に用いた。粘土や掘削土の混入した試料の作成も家庭用ミキサーによって行っている。

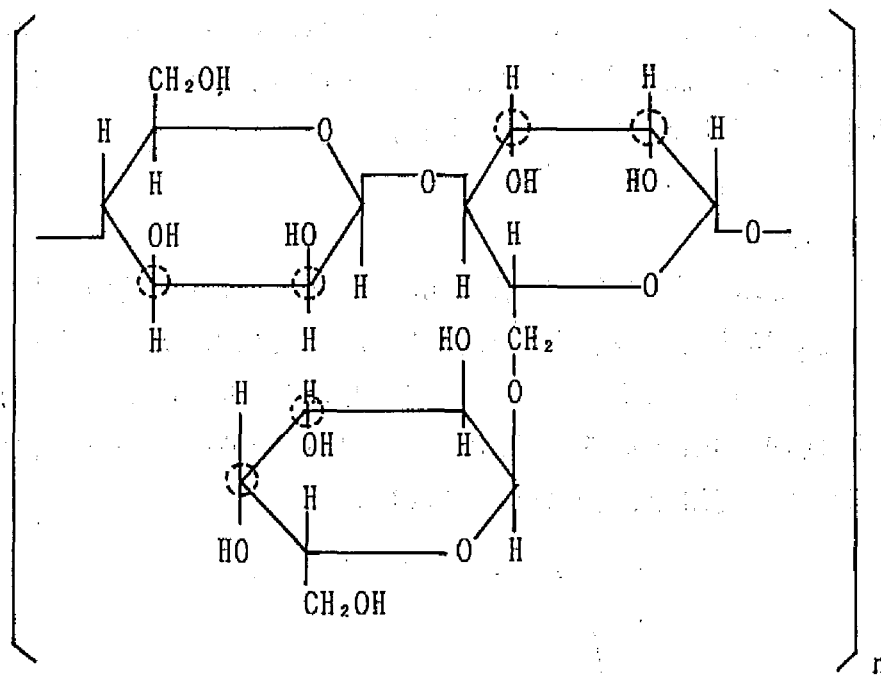
iii) 測定項目と方法

粘度: ファンネル粘度計(500/500ml)およびB型粘度計による。

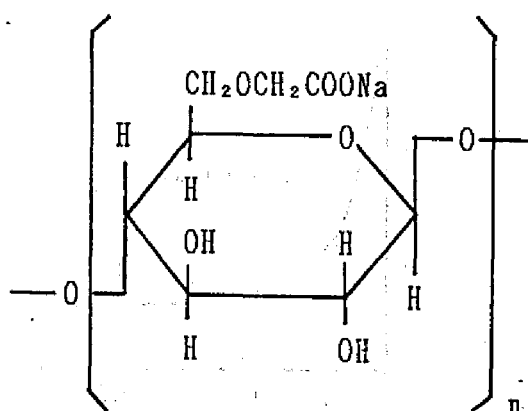
造壁性: 加圧ろ過試験機(API規格, 3Kg/cm² 30min)によるろ液量を脱水量として表示した。

濁度: 粘土を含むポリマ-懸濁液を希釈し、24時間静置後の表面の濁度を吸光度計によって測定した。

沈底容積: 濁度測定の際、沈殿部の容積を測定し固形分の重量に対する体積で



Guar Gumの主成分(Guaran)



CMC

図-3.1 供試ポリマーの化学構造

表示した。

ポリマ-吸着量: 粘土を含むポリマ-懸濁液を希釈し, この懸濁液を遠心分離(12000rpm, 20min)して上澄液のポリマ-濃度を重クロム酸法によって測定した。この結果から粘土へのポリマ-吸着量を算出した。

2.2 実験結果

i) 粘度および造壁性

ファンネル粘度と脱水量を図-3.2に示す。Guar Gum溶液はCMC溶液に比べてかなり高く, 0.5%溶液で45秒前後の値を示し, B型粘度計では300cp前後となる。また, 脱水量は溶液では著しく高く, 造壁性は劣る。しかし, 少量の粘土を添加することにより脱水量は10-20mlとなる。実際の施工では掘削の際に掘削土に由来する粘土が混入するので, 実用上は特に問題はない。

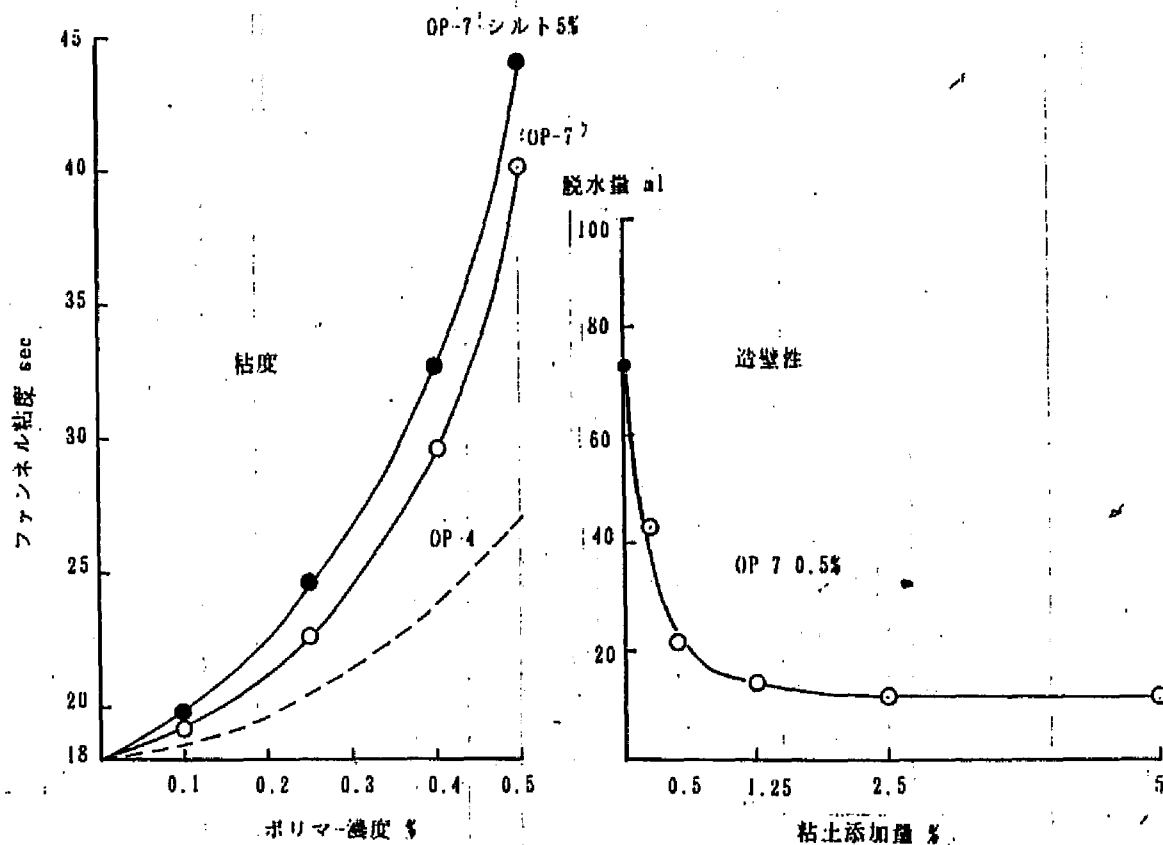


図-3.2 GuarGum溶液の粘度, 造壁性

ii) 分散性

安定液としてくりかえし使用するためには, 使用時に混入する掘削土やセメントなどによる劣化を受けにくいことが必要である。そこで, ポリマ-・粘土の系について濁度と沈底容積を測定した。図-3.3に示すように, CMCでは少量の添加で濁度は著しく上昇し, 沈底容積は減少する。これに対し, Guar Gumでは0.05%前後の添加では濁度は減少し, ポリマ-は凝集作用を示すが, さらに添加するとCMC

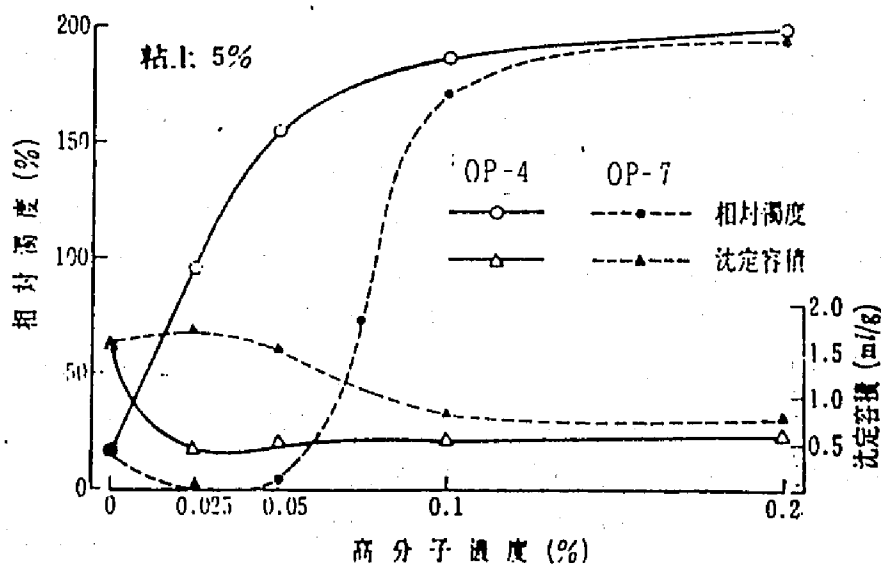


図-3.3 粘土懸濁液の水溶性高分子による分散

と同様に顕著な分散作用を示すようになる。この差異は図-3.1に構造を示すようにCMCがアニオン性のポリマーであるのにたいし,Guar Gumが非イオン性ポリマーであることに起因すると思われ,Guar Gumはポリビニルアルコール³⁵と同様の挙動を示す。

次に、粘土へのポリマーの吸着量を求め、吸着等温線を図-3.4に示す。いずれのポリマーも粘土表面に吸着し、その吸着タイプはLangmuir型の単分子層吸着であることを示している。吸着量はCMCに比べて多い。

このような粘土表面へのポリマーの吸着によって、保護コロイドが形成されており、被覆するポリマーが水溶性のものであるため粘土粒子は厚い水膜でおおわれることになる。このような保護コロイドは吸着した水和ポリマーの立体障害作用によって高い分散・安定性を有することが知られている。³⁶

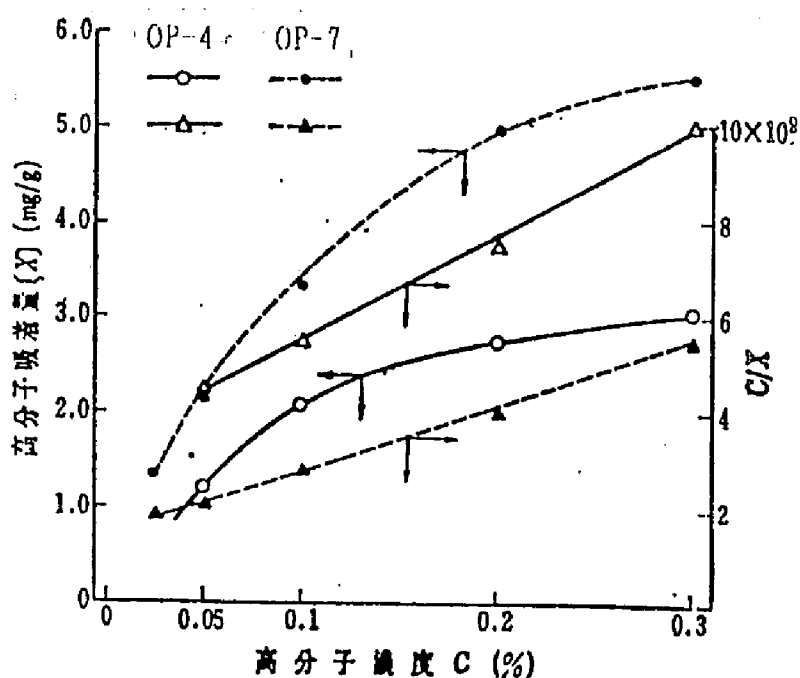


図-3.4 吸着等温線

iii) 耐久性

有機性高分子のGuar Gumの水溶液を掘削用安定液として用いる場合に問題となるのは、その腐敗による性能低下である。図-3.5に安定液の粘度および脱水量の経時変化を示す。この結果によれば、掘削土の混入の有無を問わず粘度は数日で水と変わらない程度にまで低下し、脱水量は著しく増大し急速に劣化する。養生中の安定液の細菌数を普通寒天培地混釈法によって測定すると、作成当初の値は 10^5 /ml前後であったものが劣化後には 10^7 - 10^8 /mlに及んでいる。このような現象はCMCの安定液についても認められており、その対策としてCMCのエーテル化度の向上が有効である。Guar Gumの場合には天然物であるためこのような対策はとりにくいので、変質防止剤(防腐剤)の添加を検討した。図-3.6に示すように、PCMX(パラクロメタキシレノール)の添加はGuar Gum溶液の性能低下の防止に有効である。

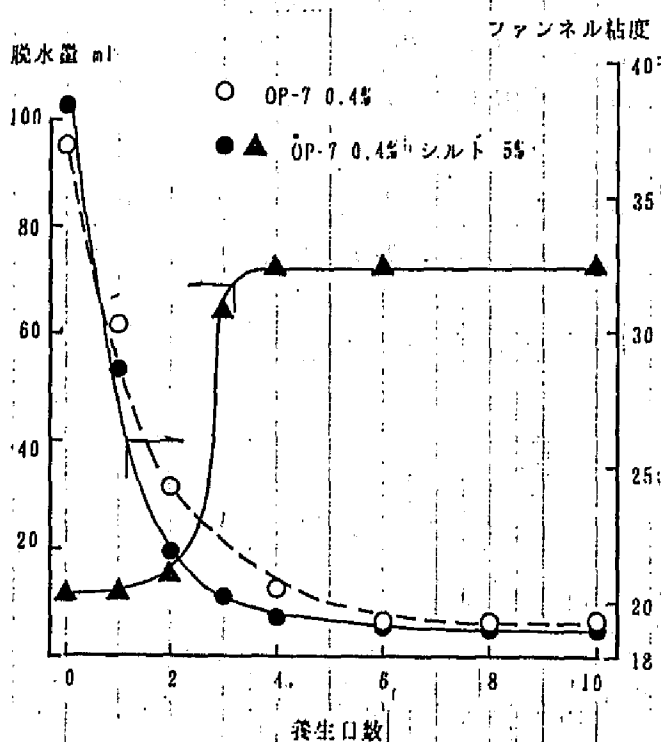


図-3.5 Guar Gum溶液の変質(20°C)

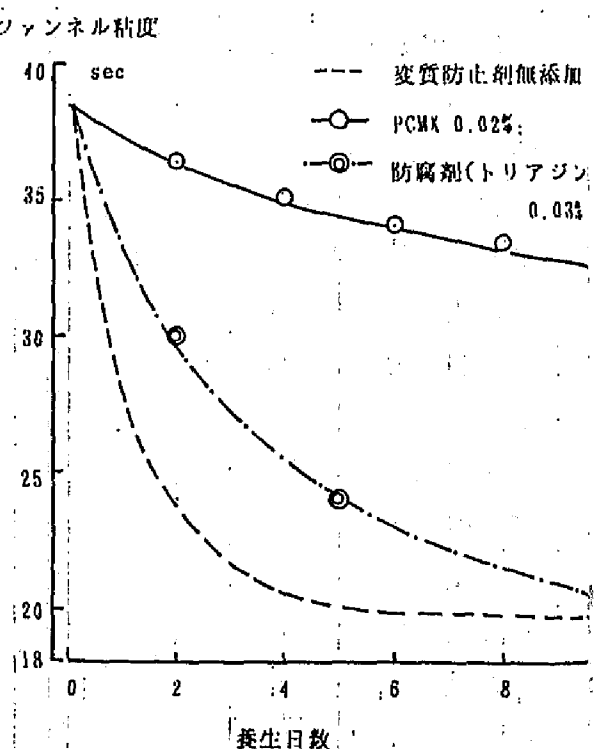


図-3.6 変質防止剤の粘度低下防止効果
(OP-7 0.4% シルト 5%);

3. ゲル化したGuar Gum溶液の性質

3.1 実験方法

i) 供試材料

2.1で述べた材料のほかに次のような材料を用いた。

ゲル化剤:ホウ砂(ホウ酸ナトリウム $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)

酸:工業用液体硫酸アルミニウム(Al_2O_3 換算で8%溶液)

アルカリ:25%水酸化ナトリウム

掘削土:関東ローム赤土(東京都清瀬市で採取)

ii) ゲル化の方法

2.1で述べたように作成した溶液あるいは懸濁液に安定液の0.01-0.1%のホウ砂を添加し家庭用ミキサーで混練してゲルを作成した。

iii) 粘度の測定

B型粘度計および攪はん機によった。後者の場合、攪はん棒にトルクメータを取り付け攪はんに伴う抵抗力を測定し、計算により粘度を求めた。

3.2 実験結果

i) ゲルの流動特性

Guar Gum溶液にゲル化剤を添加すると写真に示すような流動性のあるゼリー状のゲルができる。その流動特性は図-3.7に示すように、B型粘度計により低いズリ速度で測定するとニュートン流体の挙動を示し、かくはん機により測定するとビンガム流体の流動曲線を示す。このような流動挙動は網目構造を有する高分子溶液ではよく見られるもので、これを粘弾性体と呼んでいる。³⁷粘弾性体を特徴づける緩和時間(この時間より短い時間の変形に対しては弾性体として、長い時間の変形に対しては粘性体として扱われる時間)については測定していない。ともかく、逸泥のように比較的ゆっくりとした浸透ではこのゲルは粘性体として扱いうるであろう。そこで、以後は主にB型粘度計による粘度に



写真 GuarGumゲルの状態

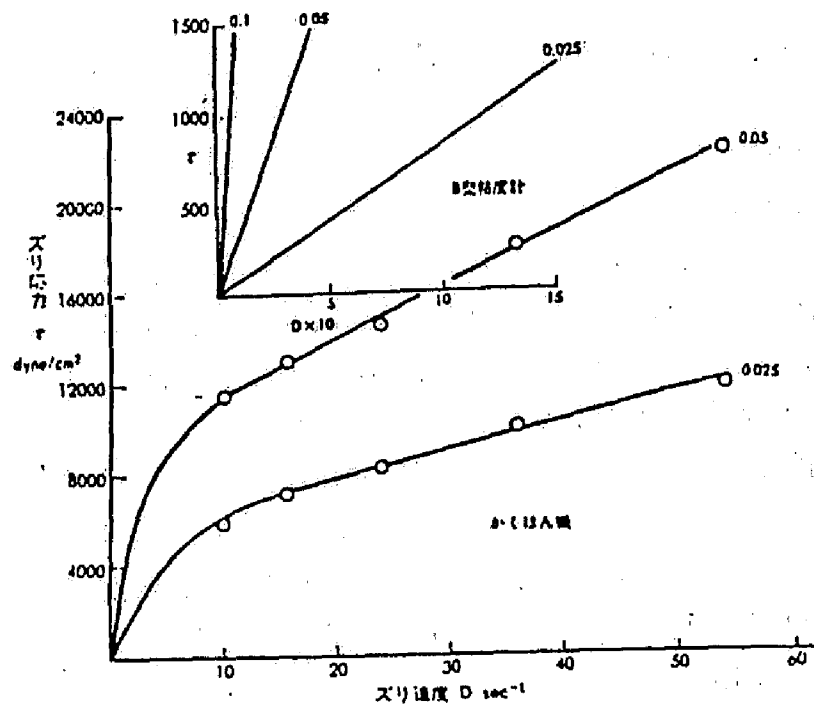


図-3.7 OP-7 ゲルの流動曲線 (ポリマー0.5%,
添字はゲル化剤濃度%)

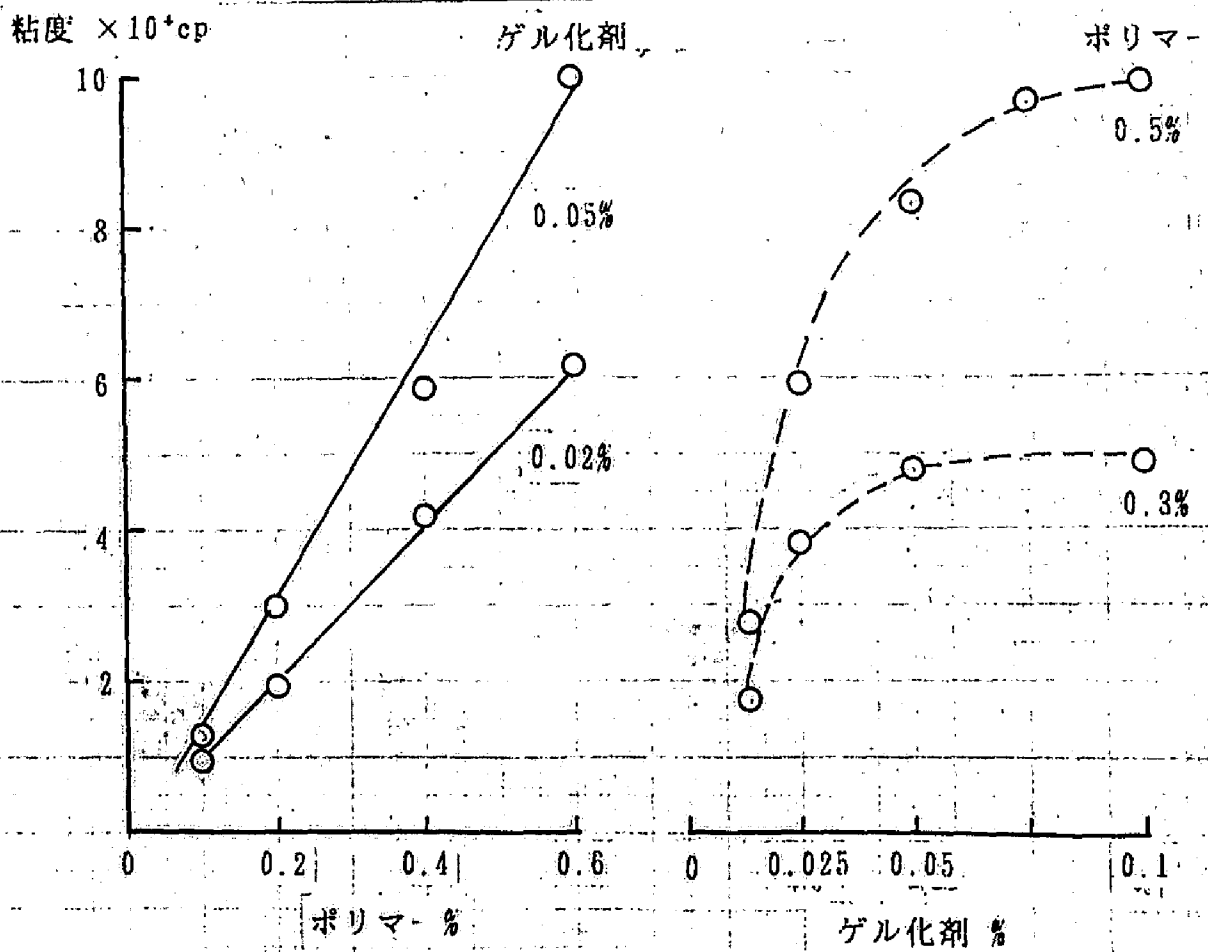


図-3.8 Guar Gumゲルの組成と粘度の関係

よってこのゲルの流動特性を評価する。

Guar Gumゲルの組成と粘度の関係を図-3.8に示す。ゲル化剤の添加濃度が0.1%までは添加濃度の増大につれて粘度が上昇するが、これ以上の添加では粘度は頭打ちとなる。ゲル化剤と反応しうるのは図-3.1に示すようにポリマーの含むシスOH基といわれ³⁰ており、このOH基が飽和されるのがゲル化剤の添加濃度0.1%に相当するものと思われる。一方、ポリマー濃度の増大に対しては粘度は直線的に増大し、例えば0.5%では50000CP前後にもなる。このようなゲルは手で持つこともできるようになるが、一般のポンプによって輸送することがかなり困難になる。

ii) ゲルの粘度低下と回復

i) で述べたように形成されたゲルに多量の掘削土が混入すると図-3.9に示

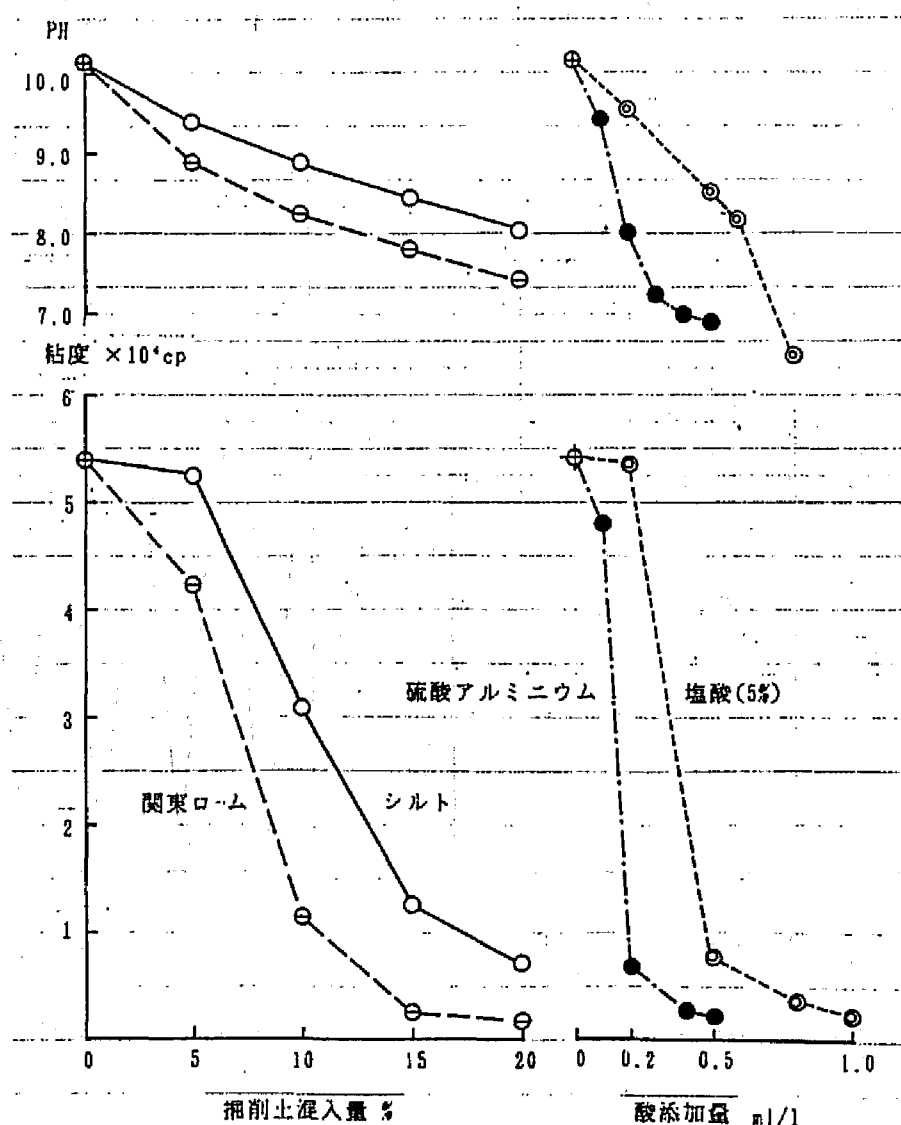


図-3.9 土および酸による解ゲル

すように粘度が低下し、その際PHも低下する。このような粘度低下は硫酸や塩酸
 のような酸や硫酸アルミニウムなどの添加によっても生じる。さらに、図-3.10
 に示すように粘度が低下して液状になったものにアルカリを添加すると粘度が
 再び上昇する。Guar Gumゲルのこのようなゾルゲル転換する性質は実際の施工
 にも利用することが可能である。すなわち、掘削時には逸泥防止のためにゲル状
 態を維持することが必要であるが、コンクリート打設時に回収された安定液に含
 まれる土砂を分離するためには安定液の粘度は低いほうが好ましい。したがっ
 て、回収液に少量の酸を加え解ゲル化して土砂を除去し、クリーニングした安定
 液にアルカリを添加してゲル化して再び使用することが可能になる。このゾル
 ゲル転換は図-3.11に示すように、何回もくりかえすことが可能である。Guar Gu
 mゲルのこの性質は図-3.12のように安定液のPHに支配される。すなわち、PHが7.
 5以下ではゾル状態に、PHが8.5以上ではゲル状態を示す。この現象はゲル化剤で
 あるホウ酸ナトリウムの解離がPHによって支配されることに起因するとおもわ

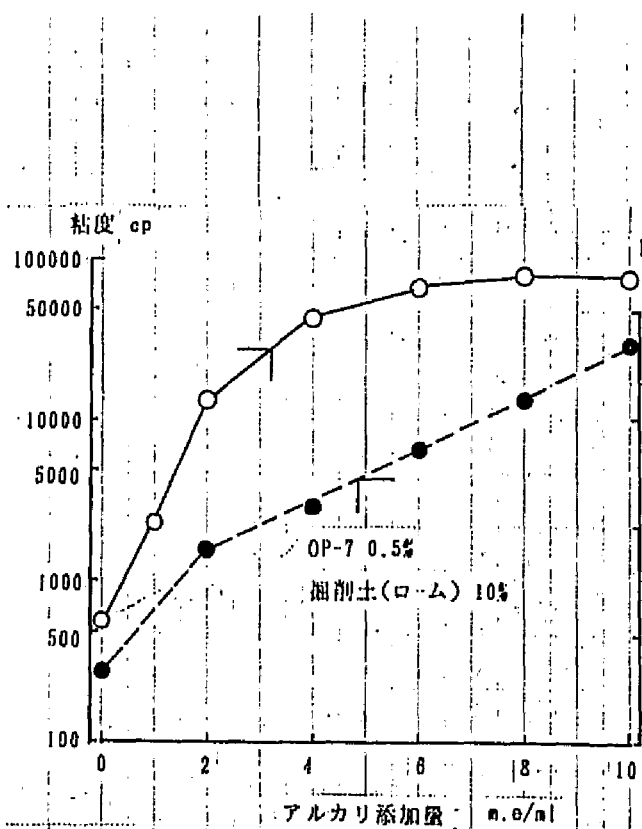


図-3.10 アルカリによる再ゲル化

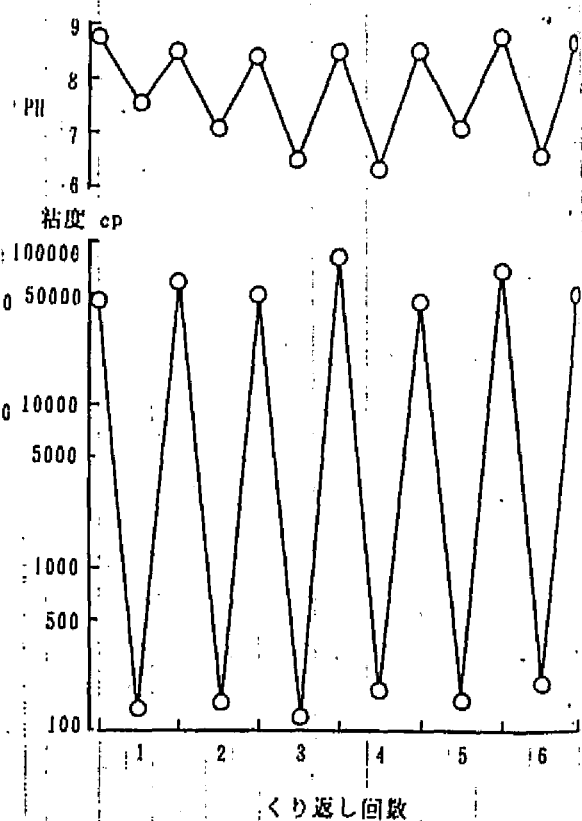


図-3.11 解ゲル、再ゲル化のくり返し

れる。なお、ゾルゲル転換の境界となるPH値は掘削土が混入するとやや高い側にずれる傾向にある。

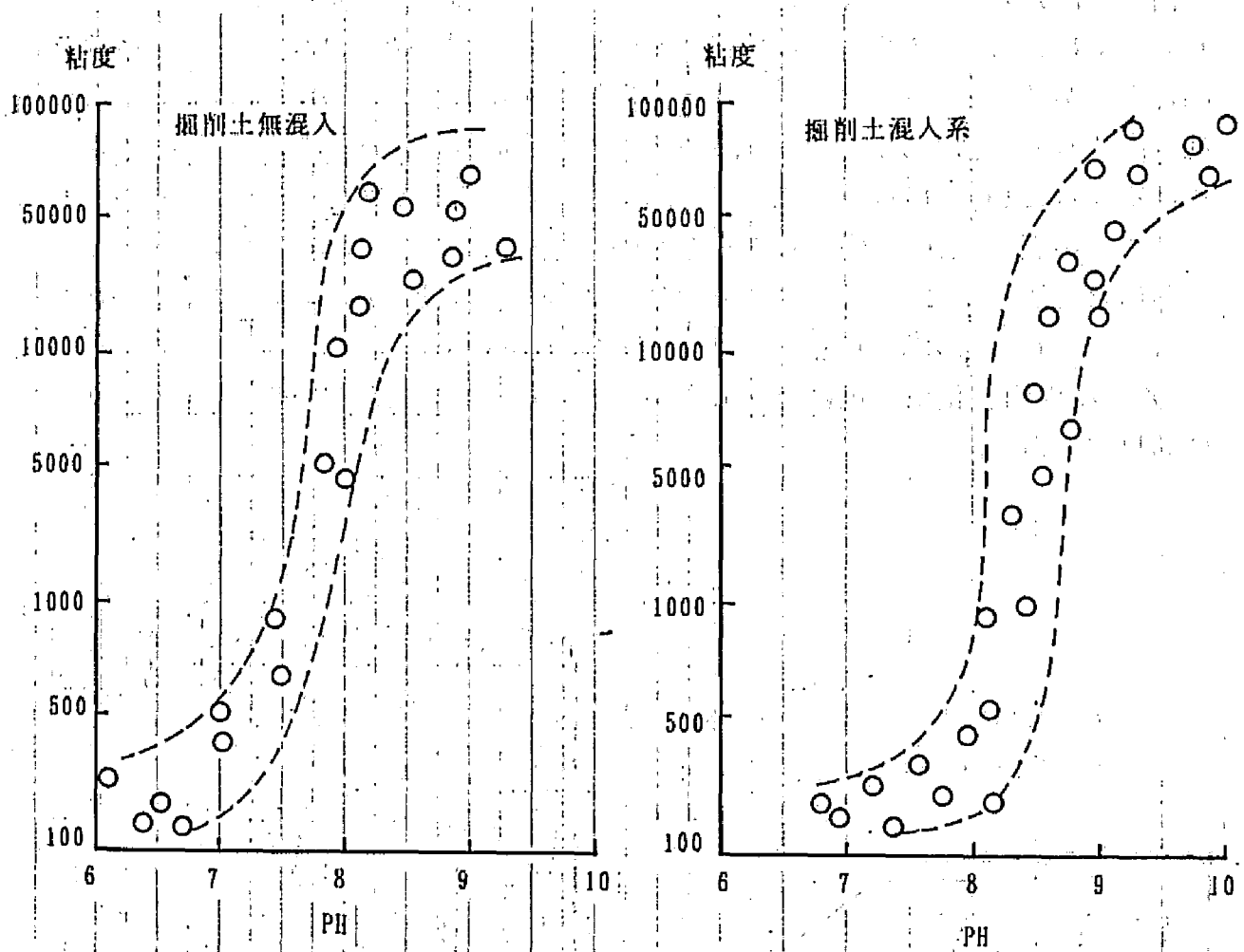


図-3.12 粘度とPHの関係

iii) ゲルの微生物劣化

ゲルを室温に養生すると図-3.13に示すように徐々に粘度が低下する。とくに掘削土が混入したゲルでは粘度低下が速く、同時にPHも低下する。粘度低下が生じてすぐに、アルカリを添加してPHを9.0以上に戻すと、図-3.14のように粘度は回復するが放置すると再び粘度、PHともに低下する。これをくりかえしているといつてもPHを高くしても粘度が回復しなくなる。このような状態になった溶液の細菌数を測定すると 10^6 /mlのオーダーとなっており、ゲルの劣化も微生物によるものであることが判る。粘度が回復しなくなるのは、微生物によってGuar Gumの高分子鎖が加水分解されて短く、すなわち低分子になるため、PH調節によって架橋が起こるようにしても分子のからみあいが少なくなるのであろう。

ゲルの微生物劣化の防止についても図-3.14のように変質防止剤のPCMXの添加は効果的である。

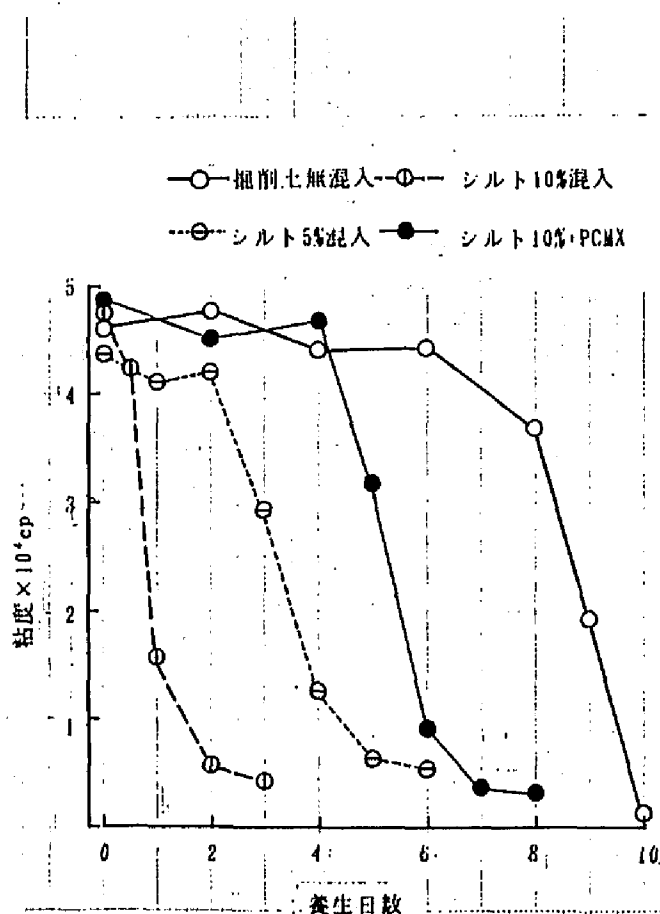


図-3.13 ゲルの粘度の経時変化

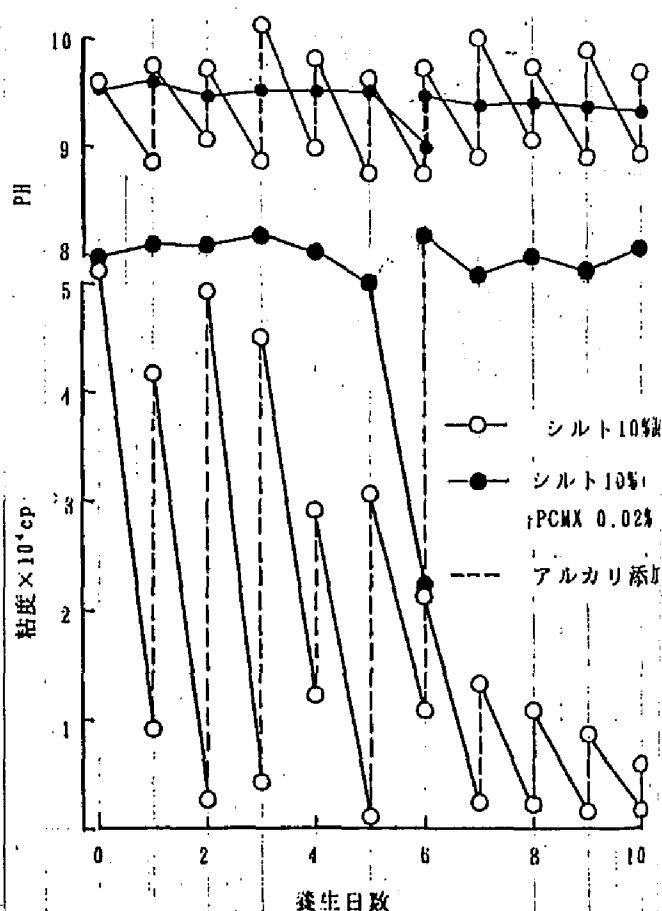


図-3.14 粘度低下とアルカリによる粘度回復のくり返し

4. Guar Gumゲルの逸泥防止効果

4.1 実験方法

i) 供試材料

ゲル: 0.1-0.5%のGuar Gum溶液に0-0.2%になるようにホウ砂を加えてゲルを作成した。ゲルには0.02%の変質防止剤(PCMX)を添加した。

ベントナイト: 群馬県産の250メッシュのものを使用した。

ii) 逸泥試験装置

2.2で述べた装置を使用した。地盤モデルとしては表-3.1のように, 0.5mm, 1mm, 5mmのガラス玉を使用した。

表-3.1 地盤モデル

ガラス玉径	粒径範囲 mm	透水係数 cm/sec
0.5 mm	0.42-0.59	1.5×10^{-1}
1 mm	1.0-1.4	6.3×10^{-1}
5 mm	4.5-5.5	4.4

iii) 測定方法

逸泥試験装置にガラス玉を充填し水分飽和としたのち, この上に1000mlのゲルを入れ, 0.5Kg/cm²の圧力で加圧し15min後の排水量および浸透距離を測定した。

4.2 実験結果

図-3.15, 3.16に逸泥実験の結果を示す。ポリマ-0.5%の場合, ゲル化剤無添加ではいずれの地盤モデルでも排水量は600mlを越え, 浸透距離も15minで20cm以上となり排水の濁りが著しくなる。ゲル化剤が少量添加されるだけで排水量は極端に減少し逸泥防止効果が明らかになる。また, ポリマ-濃度との関係を見ると地盤モデルNO.1(0.5mm)ではポリマ-濃度が0.2%でほとんど浸透しなくなり, モデルNO.2では0.3%, モデルNO.3では0.5%で同様な現象が見られる。このように, Guar Gumゲルの加圧下の排水量は地盤モデルの種類すなわち透水係数, ポリマ-濃度, ゲル化剤濃度に支配される。そこで, 透水係数とゲルの粘度によって逸泥の有無を判別することが可能と考え図-3.17のように整理した。図中, 逸泥の有

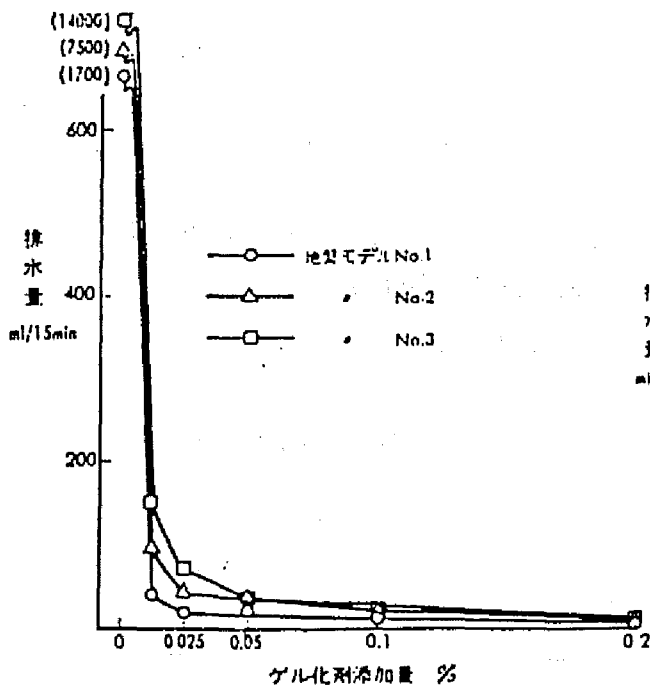


図-3.15 逸泥実験の結果(1)

(ポリマー0.5%, ペントナイト1.5%)

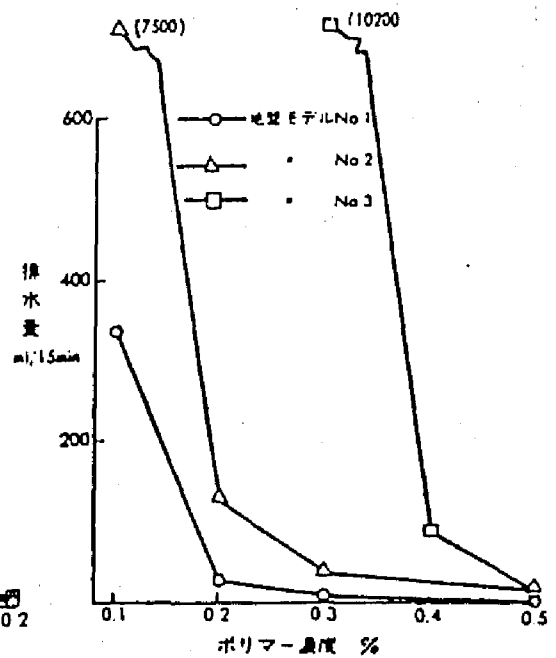


図-3.16 逸泥実験の結果(2)

(ゲル化剤0.1%, ペントナイト1.5%)

無の判定基準は排水量50ml/15minとした。この図から、地盤の透水係数が与えられれば逸泥防止に必要な粘度を予測することができ、さらに必要なポリマー濃度やゲル化剤の濃度も推定することも可能になる。また、従来、安定液のみでは逸泥防止が不可能と考えられていた 10^0 cm/secのオーダ-の透水係数の地盤でもゲルの粘度の調節によって逸泥の防止が可能であることも明らかである。

なお、このゲルの場合、浸透範囲が20cm以内では排水の濁りはまったく認められない。また、排水量の測定値は、浸透距離内の間隙水が完全にゲルによって置換されたとして計算される排水量と一致する。これらの事実は、ゲルが地盤モデル中で希釈、拡散することがなく、したがって、ゲルの浸透した範囲はゲルで完全に充填され、止水化されると考えられる。

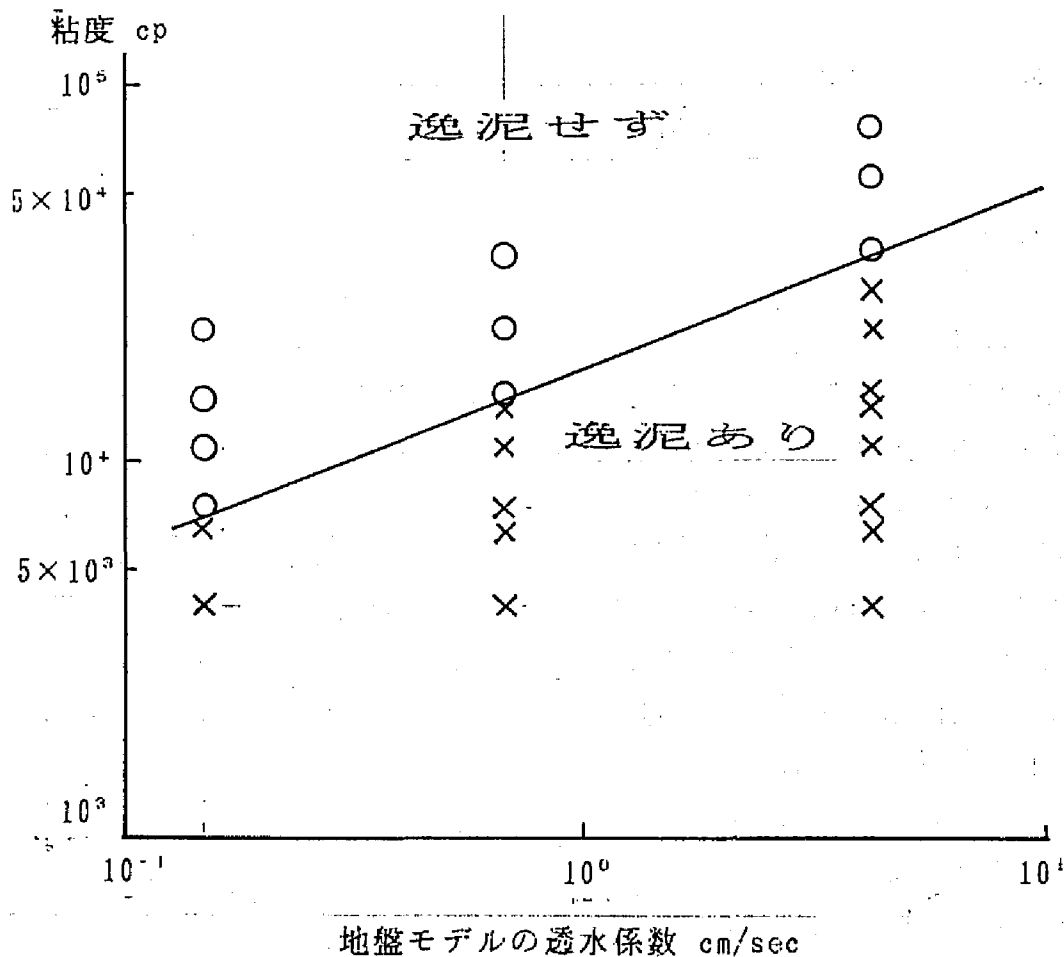


図-3.17 逸泥防止に必要な粘度

5. おわりに

ガラクト・マンナンを主成分とするGuar Gumの水溶液をホウ砂によって架橋したゲルの物性および逸泥防止特性を室内実験によって検討した。その結果、Guar Gumゲルは特異な粘弾性流体であり、系のPHを調節することによりゾル・ゲル転換を行うことが可能であり、透水係数が 10^0 cm/secを越える地盤でも逸泥防止が可能であることなどが明らかになった。これらの特性は、このゲルが砂れき地盤を地中連続壁工法によって掘削する際に極めて有効であることを示している。地盤掘削用安定液にはほかにも、安定液の製造方法、輸送方法、コンクリートの打設にとって障害とならないかなど考慮すべき点があるが、これらは逸泥防止に比べれば二次的なものであり、現状の施工技術によって解決は可能である。したがって、次の課題はGuar Gumゲルを実際の工事現場に適用し、その中で施工上の問題を解決するとともに、その性能を実証することであろう。

第四章 逸泥防止用ポリマー安定液の適用例(1)^{3,3,4} ビルの地中壁工事

1. はじめに

我が国には内陸部の扇状地に多くの都市が発達している。例えば、札幌、山形、前橋、甲府、長野、岐阜、京都などがあげられる。これらの都市では地盤が砂れきで構成されることが多く地盤の支持力は大い。しかし、この地盤を掘削して地下に構造物を築造する場合には豊富な地下水のために掘削が難渋することが多い。岐阜市の中心部で地下室を有するビルの建設が計画され、地中連続壁工法による地中壁によって地下水を遮断することとなった。このような場所で地中連続壁工法を施工する場合には、すでに述べたように逸泥の防止が最大の課題となる。そこで、前章で述べた逸泥防止用ポリマー安定液の適用性について検討する試験工事を行うとともに、この結果をふまえて本工事を成功させることができた。本章では検討経過および施工状況を述べる。

2. 工事概要

2.1 地盤および土質条件

現場は付近を流れる長良川の扇状地に発達した岐阜市街地の中心に位置し、ほぼ全層が砂れきで構成される。地下水は豊富かつ良質であるため、工事現場の周辺にも20m未満の浅井戸が飲用をはじめ生活用水として広く利用されている。土質構成を図-4.1に示すように、玉石混じりの細粒分をほとんど含まない砂れきを主体とし、揚水試験による地盤の平均透水係数は $9.1 \times 10^{-1} \text{ cm/sec}$ である。特にGL-12m付近では粒径から

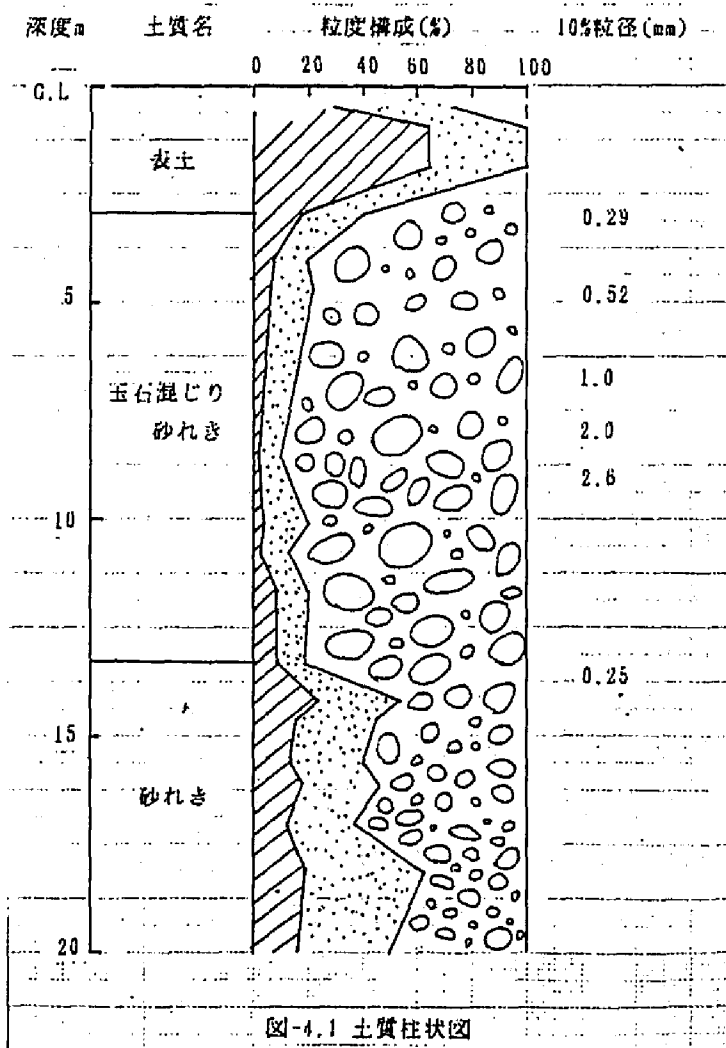


図-4.1 土質柱状図

計算される透水係数が $6.7 \times 10^0 \text{ cm/sec}$ に及ぶ。地下水は長良川の流向に沿って伏流しているといわれ、現場では地下水位がGL-5~-6mを上下している。

2.2 地中壁工事

工事は地上10階地下2階の事務所ビルを建設するもので、地下部分の工事をする際の地下水の流入を防ぐために鉄筋コンクリートの地中壁をあらかじめ築造することになった。地中壁は安定液による掘削を行う地中連続壁工法によるものとし、その規模は表-4.1に示すようなものである。地中壁工事は昭和50年1月から3月にかけて行われた。

2.3 施工条件

市街地の工事であるため地中壁工事の際の溝壁の崩壊による周辺地盤の沈下や陥没は許されない。また、周辺には生活用の揚水井戸が多数分布するので地下水の汚濁も防止しなければならない。このような制約条件を考えると、溝壁の崩壊や地下水の汚濁を招く逸泥を防止することが工事を円滑に進行させるカギであると考えられた。

表-4.1 地中壁工事諸元

掘削深さ	15m
掘削幅	50cm
地中壁面積	2963m ²
1パネルの長さ	5.4m
掘削機	バケット式(2台)

3. 試験工事による逸泥防止対策の検討

3.1 試験方法

i) 試験の構成と内容

あらかじめ掘削した深礎孔(平均直径:2m, 深さ:10m)の水をポンプで排水し、ここに各種安定液を入れ、逸泥の状況および周辺の地下水の水質を調査する方法によって行った。深礎孔および観測井の配置を図-4.2に示す。深礎孔は上部4mに有孔率5%になるように穴をあけ、この深さで逸泥が生じるようにしている。試験は表-4.2に示すように、性状の異なる安定液を用いた3ケースについて行った。各ケースともに深礎孔に充満した安定液の周辺地盤への浸透状況を18時間前後、観測した。また、ケース1とケース2の間隔は2週間としている。

ii) 地下水の水質監視

現場内に設けた観測井によって逸泥による地下水の汚濁状況を調査し、水質監視項目としては過マンガン酸カリ消費量と濁度を採用した。

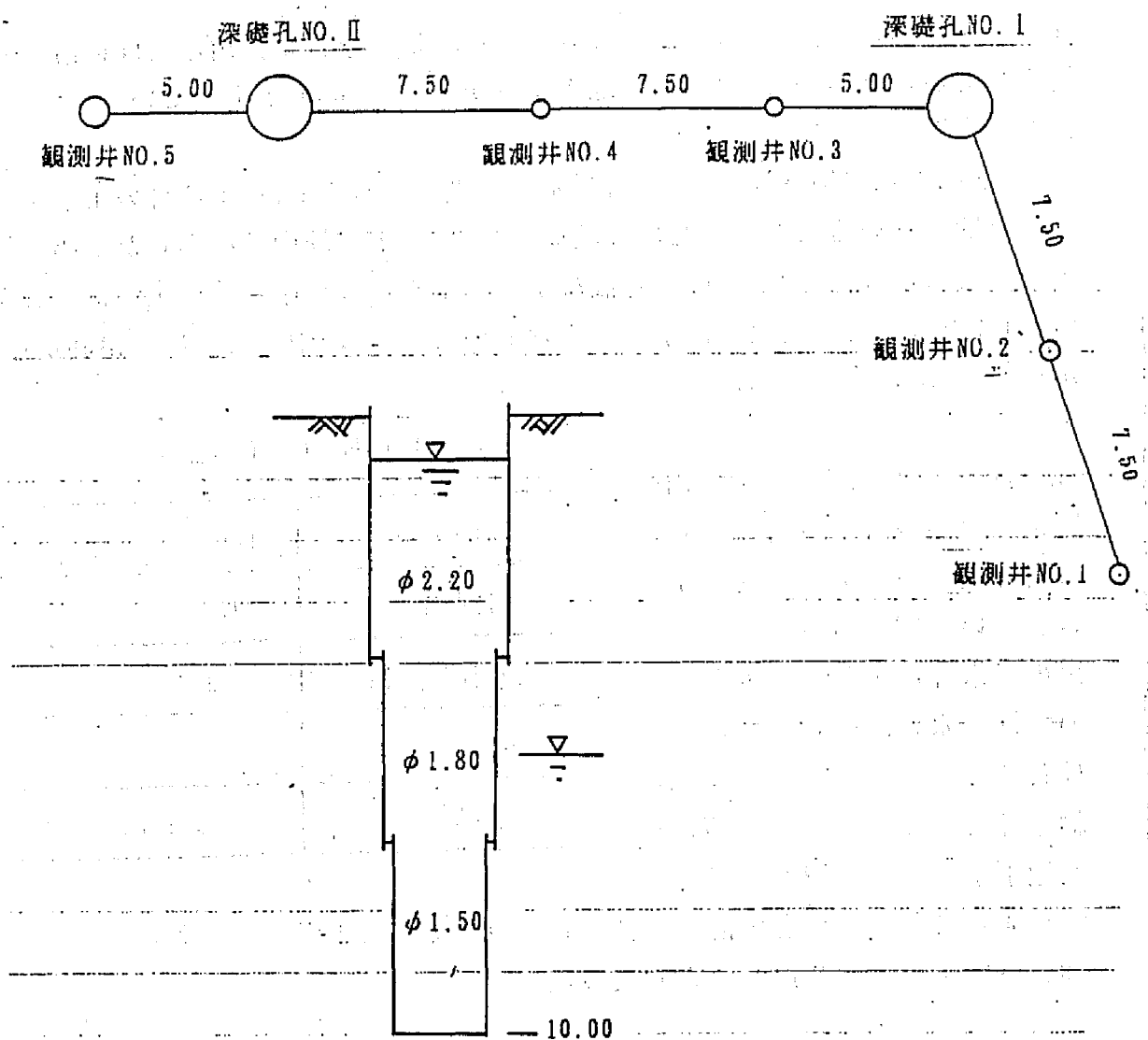


図-4.2 深礎孔の形状と観測井の配置

表-4.2 試験内容

試験-1	深礎孔NO. II にゲル化前安定液を注入 (OP-7 0.5%, ベントナイト 1%, 変質防止剤 0.02%)
試験-2	深礎孔NO. I にゲル化安定液を注入 (試験-1の調合の安定液にゲル化剤 0.04%を添加)
試験-3	試験-2が終了後、安定液をゲル化前安定液によって置換

3.2 試験結果

各試験の逸泥状況を水位低下曲線によって図-4.3に示す。ゲル化させないOP-7安定液の場合深礎孔NO. IIに注水したが、安定液を注水してもなかなか水位が上昇せず注水中にも逸泥が著しい。注水を停止してからも、図中のAのように水位

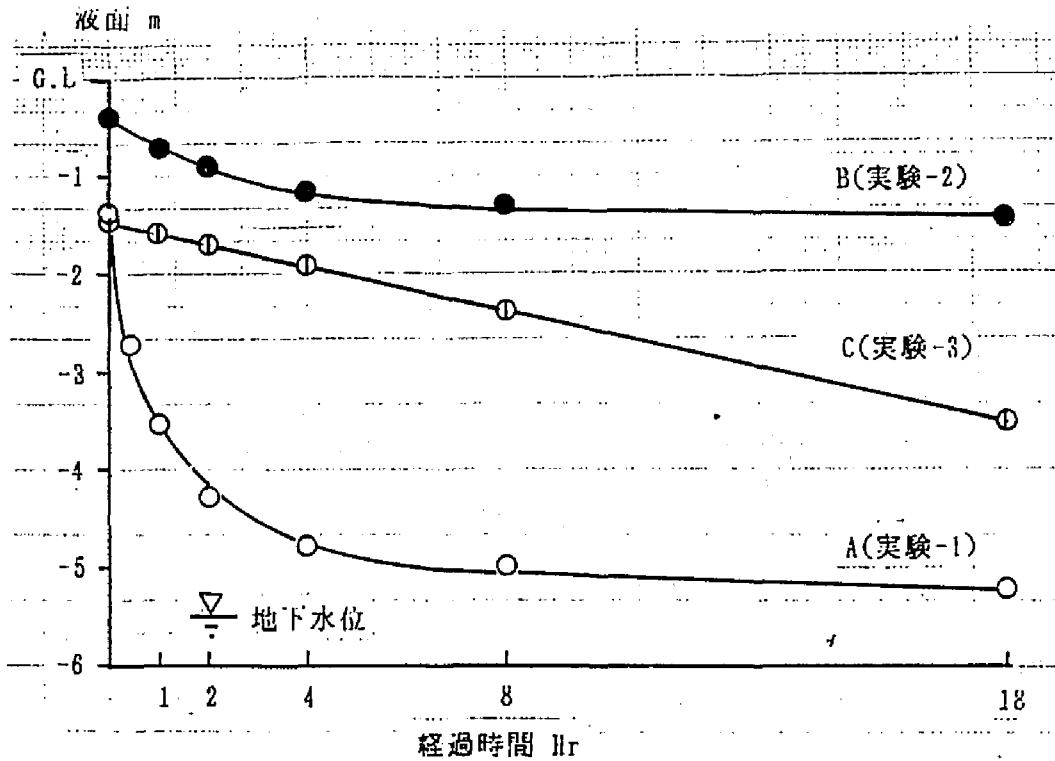


図-4.3 深礎孔内の液面の変化

低下は著しく初期の逸泥速度は $11.3\text{m}^3/\text{Hr}$ となる。この値から実際の地中壁の規模における逸泥量を算出すると約 $30\text{m}^3/\text{Hr}$ となる。このような逸泥に対しては、一般の安定液製造設備では対応することができず、液面の低下とそれにもとづく溝壁の崩壊は避けられない。また、観測井の水質は図-4.4に示すような変化をした。いずれの観測井でも注水と同時に濁度が上昇し始め、注水完了後1-2時間で汚濁がピークに達する。その後の濁度の低下も比較的速く3日後にはもとのレベルに戻る。濁度の上昇が最も速く、かつ汚濁レベルが最も高いのは注水孔に近いNO.5の観測井である。

また、観測井水の過マンガン酸カリウム消費量の最大値の対数を注水孔からの距離に対してプロットすると図-4.5のように直線が得られる。この図から過マンガン酸カリウム消費量が注水前のレベルの 0.3mg/l となる距離を求めると約 30m となる。即ち、この間の逸泥量である約 26m^3 の安定液の浸透によって地下水が汚染される範囲は約 30m の範囲である。この汚染範囲は安定液が地盤内で希

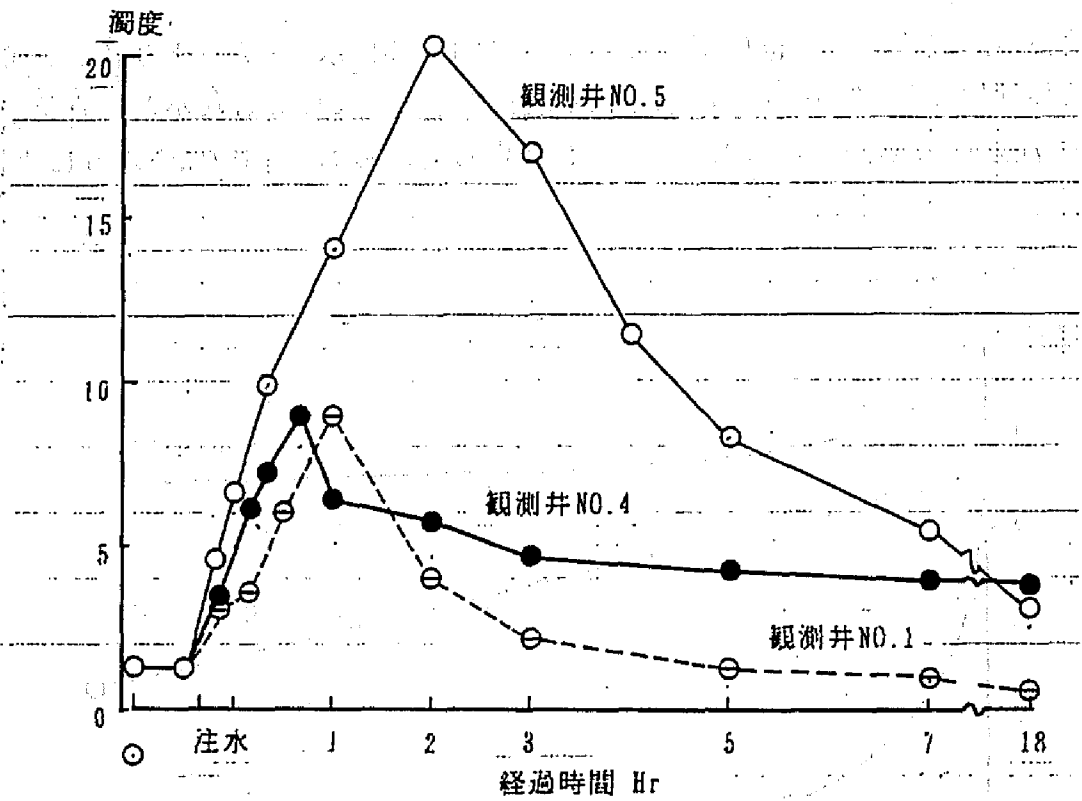


図-4.4 観測井水の濁度の経時変化

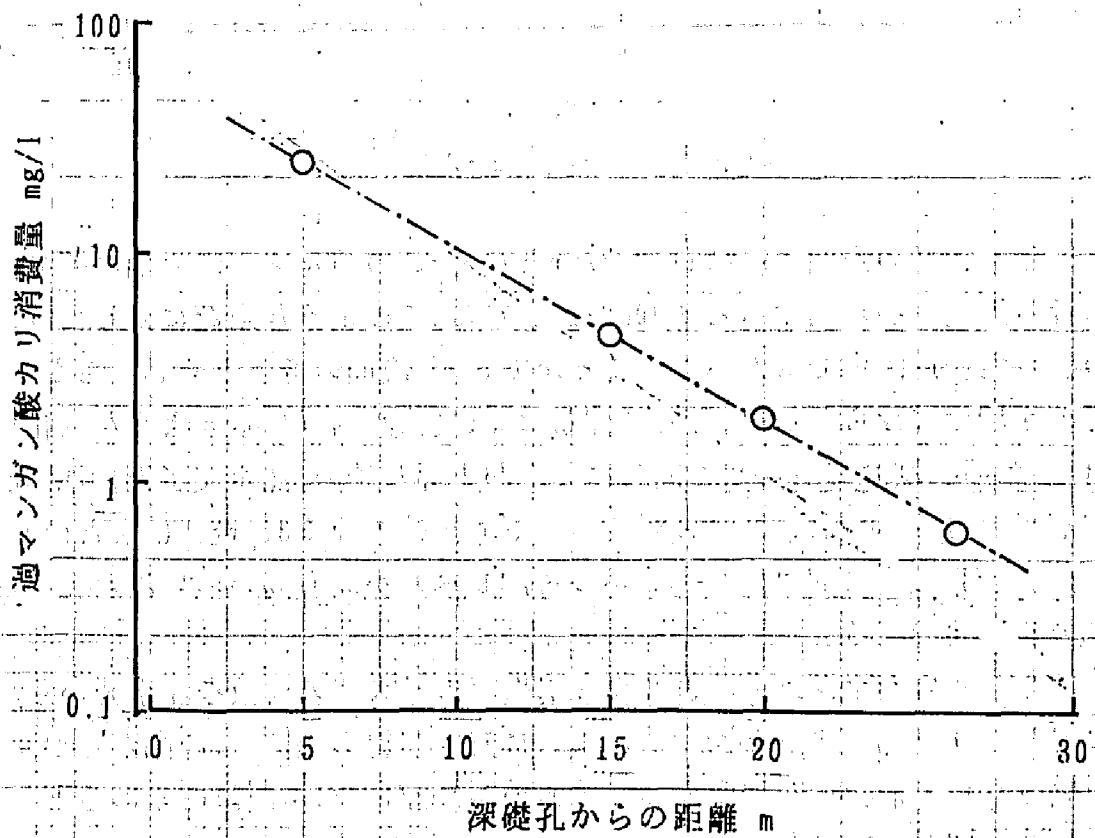


図-4.5 過マンガン酸カリ消費量と距離の関係
(非ゲル化安定液の場合)

積、拡散していないと仮定して求めた浸透範囲の約15倍に相当する。

次に、深礎孔NO. I にゲル化したOP-7を注水した。その際、通常の水中ポンプではゲルを送ることができないため、ブレードレスポンプを用いた。この場合の水位変化は図-4.3のBの曲線で示される。注水の際の逸泥量は僅か 2m^3 であり、注水後の水位低下も一夜で約1mであり、16時間後には水位低下がほとんど停止する。試験全体の逸泥量は上述のケースの約20%である。また、この場合の観測井水の汚濁はまったく認められない。これは、前章の逸泥実験で述べたように、このゲルが地盤内で希釈、拡散を受けず不動化していることを示唆している。

このようにしてゲルが浸透した深礎孔NO. I に、ゲルと置換するように通常の安定液(OP-4)を注水し、水位低下の様子を見たのが図-4.3のCである。水位は時間とともに直線的に低下するが、低下速度は曲線Aの初期の値(約 $2.5\text{m}/\text{Hr}$)の $1/10$ 以下である。この事実も、あらかじめ浸透したゲルが地盤内で不動化し、地盤を止水化していることを意味している。

以上の現場実験の結果、Guar Gumゲルを用いることにより極めて透水係数の高い地盤でも逸泥防止が可能であり、懸念された地下水の汚染も防止しうることが判明した。そこで、本工事もこのゲル(OP-7)を用いて施工することにした。

4. 本工事への適用結果

4.1 安定液の調合と性状

試験工事の結果にもとずき安定液は表-4.3の調合とした。ポリマ-濃度を試験工事より高くしているのは、掘削の際の安定液の希釈を考慮したためである。安定液の品質管理項目としては回転粘度計の一種であるビスコテスタ-(リヨン科学製)による見掛け粘度を採用した。この方法による粘度はB型粘度計による粘度の約 $1/10$

になる。ここでは、未使用の良液で 2000cp 以上、溝内液で 500cp 以上を管理基準値とした。安定液の性状の変化を図-4.6に示す。良液では $4000\sim 12000\text{cp}$ の範囲で変化するが、溝内では $500\sim 1200\text{cp}$ へと低下し、地下水による希釈が著しいことを示している。コンクリート打設時の粘度変化はほとんど認められなかった。

4.2 逸泥の状況

掘削は玉石層で難行したが、掘削機の改造により $2\text{m}/\text{Hr}$ 前後の能率となった。逸泥の速度は $0.05\sim 0.8\text{m}^3/\text{Hr}$ の範囲であり、当初予想された約 $30\text{m}^3/\text{Hr}$ に比べて著しく小さな値にとどまった。また、一夜の安定液の液面低下は 20cm 未満であり、

表-4.3 安定液の調合

ポリマ-(OP-7)	0.6%
ベントナイト	1%
変質防止剤	0.02%
ゲル化剤	0.04%

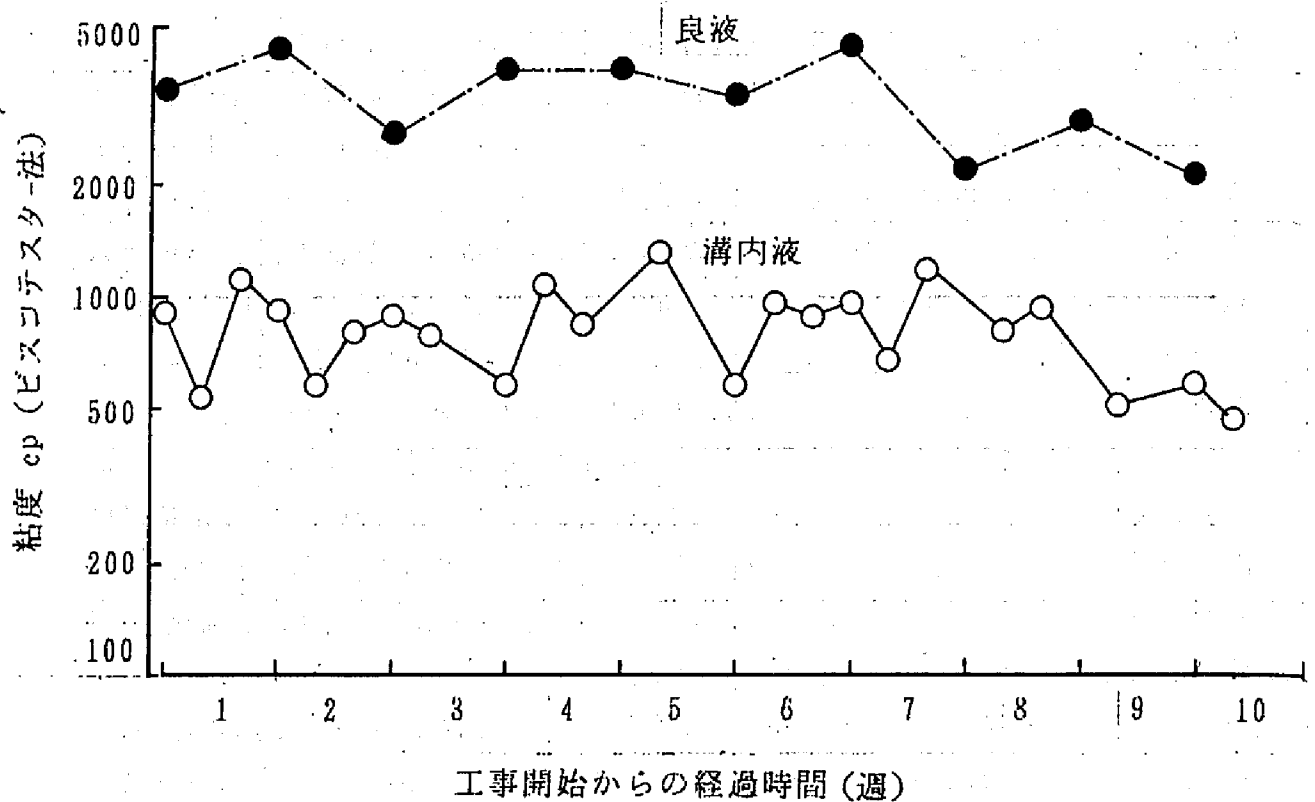


図-4.6 安定液の粘度

夜間に安定液を補給する必要はなかった。このため、掘削壁面の崩壊や周辺の地下水汚染は全く見られなかった。表-4.4に安定液の収支を示す。この表から計算される平均逸泥速度は約 $0.4\text{m}^3/\text{Hr}$ である。

4.3 施工結果

掘削、コンクリート打設ともに順調に進行し工事は所定期間内に終了することができた。コンクリート打設量の設計量に対する増加率も約20%であり、この種の地盤における値としてはかなり低いものとなった。これは、OP-7ゲルが地盤に浸透した場合の粘結効果により溝壁面の土砂が局部的にも崩落することがなかったことを示すものと考えられる。

地中壁の構築後、地下部分の掘削を行った。その際の地中壁からの漏水は全く

表-4.4 安定液の収支

掘削土量	2160 m^3
安定液作成量	1470 m^3
場外持ち出し量	270 m^3
廃棄安定液量	500 m^3
逸泥量	700 m^3

見られず、強度、止水性ともに申し分のないものであった。

5. おわりに

透水係数が 10^{-1} – 10^0 cm/secの砂れき地盤でビルの地下掘削を行うために、土止め・止水を地中連続壁工法による地中壁が計画された。この地盤では、通常の安定液では逸泥が激しく掘削が不能に陥ると考えられたので、Guar Gum(OP-7)ゲルによる現場実験を行い、逸泥防止効果を確認するとともに、周辺の地下水への水質影響についても調査した。その結果、OP-7ゲルにより逸泥はほぼ完全に防止でき、地下水への影響も掘削溝から5m以内に止どめることが可能であることが判明した。この結果をふまえ本工事を行ったが、逸泥による溝壁の崩壊や周辺の井戸の汚染などは全く認められず工事は無事終了した。我が国には各地にこのような砂れき地盤が分布するので、今回のこの結果は地中連続壁工法の適用範囲の拡大に役立つものと思われる。

第五章 逸泥防止用ポリマー安定液の適用例(2)³⁸

遊水池の遮水壁工事

1. はじめに

第四章では逸泥の懸念された玉石混じり砂れきの地盤のビル工事の地中壁を逸泥防止用ポリマー安定液を用いることにより無事成功させた事例を述べた。我が国には地下水を上水道の水源として利用している地域が全国で15%に及び、特に関東・東海地方の内陸部では30%をこえる。このような地域での地下工事では地下水汚染の防止が不可欠であり、このため施工法の選択の範囲に限られる。特に、安定液による掘削を行う地中連続壁工法は逸泥による地下水汚染の懸念から、その適用は困難であるとされてきた。そこでこの章では、地中連続壁工法による遮水壁の計画された現場のすぐ近くに市民が飲用にも利用している集水井戸がある場合の、逸泥防止用ポリマー安定液を用いた施工および地下水水質の監視についての事例を述べる。

2. 工事概要

2.1 現場周辺の状況

工事は神奈川県座間市を流れる一級河川の降雨期の氾濫防止を図るための遊水池の建設に関するものである。この河川は毎年のように梅雨期や台風時期の大雨によって氾濫するので、これを防止するため洪水時の流水を一時的に貯留し、流量のピークを過ぎてから徐々に放水するように遊水池が計画された。遊水池の平面図および断面図を図-5.1、図-5.2に示す。図示したように、遊水池のすぐ近くに揚水井戸がある。この井戸は座間市の上水道の主要水源のひとつであり、その揚水量は日量5000t前後である。この井戸に洪水時の汚水が流入しないように遊水池の地下部分には深さ23mの遮水壁が構築される。この遮水壁は地中連続壁工法によって築造されるが、図-5.3に示すように遮水壁予定位置と揚水井戸との最近接距離は約20mと極めて近く、さらにこの井戸の構造は放射状にストレーナーが伸びた満州井戸といわれるものでありストレーナーの先端との距離はさらに近くなる。

2.2 地盤条件と土質

地盤は現在流れている河川の氾濫原であり地下水は河川の流れと同じ流向で伏流しており、その流速は揚水井の近くで0.24m/minであった。土質柱状図を図-5.3に併示するように、土質は表土を除いて掘削対象の大部分が砂れきで構成される。この砂れき層の透水係数は上部が 2.2×10^{-1} cm/sec、下部で 8.0×10^{-2}

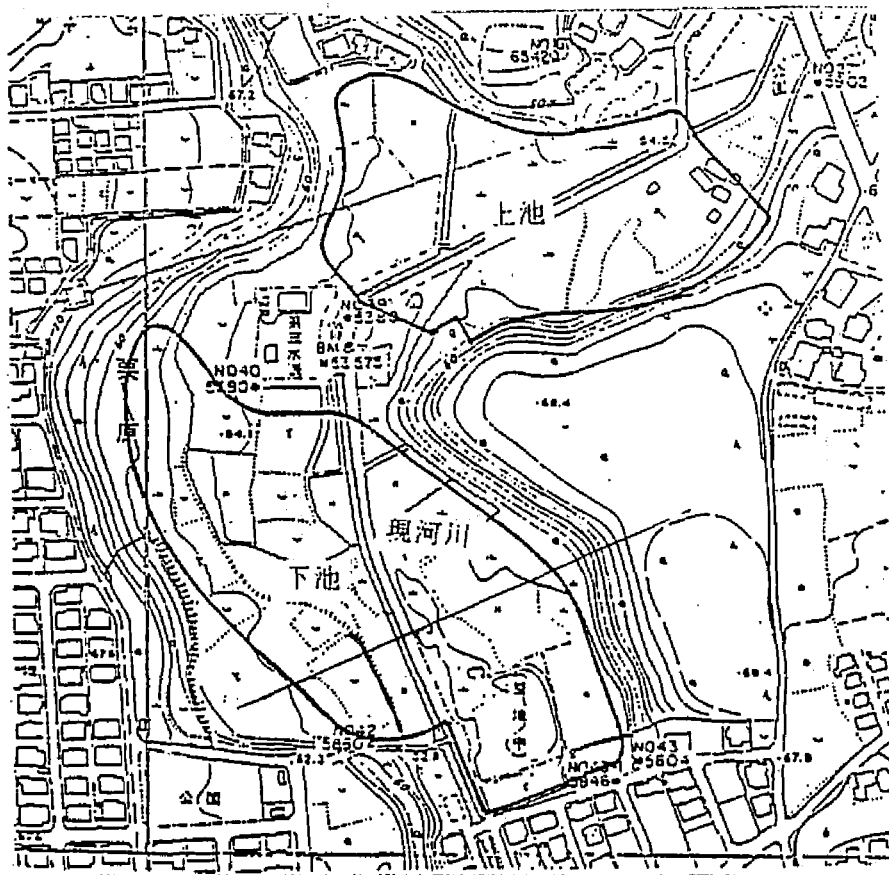


図-5.1 遊水池平面図

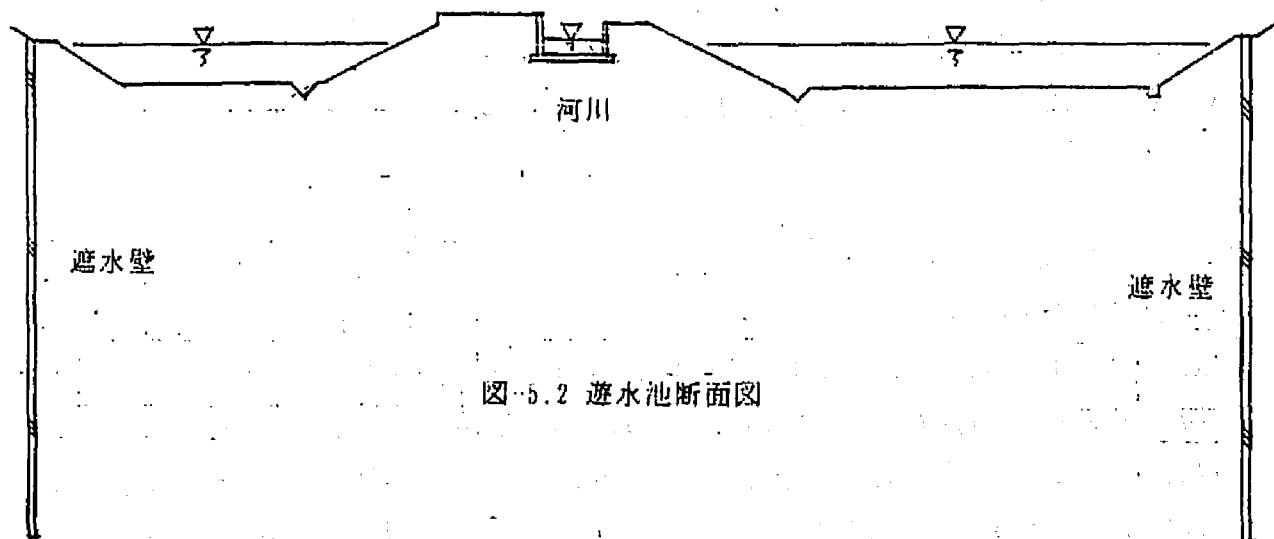


図-5.2 遊水池断面図

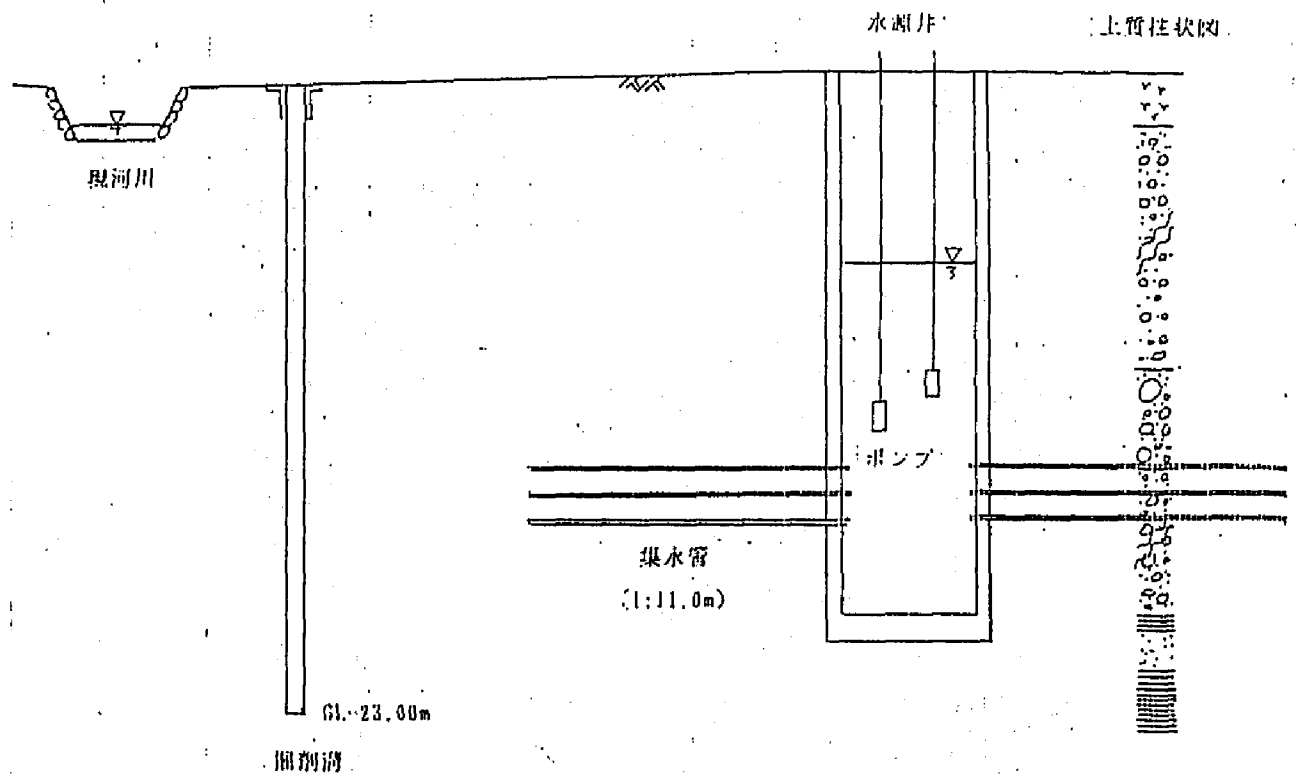


図-5.3 地中壁と水源井の位置関係と土質 1/200

cm/secであり、通常の安定液では大規模な逸泥が発生することが予想された。

2.3 地中壁工事の内容

地中壁の規模は表-5.1に示すように大規模なものである。このため工事は昭和59年から3年をかけて行われ、最初の年には安定液による掘削の際の周辺地下水の水質への影響を調査するための試験工事も行われた。掘削は逸泥防止用ポリマ-安定液(OP-7)を用いてバケット式の掘削機(KELLY-40M)によって行われた。

表-5.1 地中壁の規模

掘削深さ	23m
壁厚	0.6m
壁面積	23000m ²

3. 試験工事

3.1 試験工事の方法

i) 試験条件の設定

試験は掘削溝の近くで揚水しつつ掘削を行い、その際の地下水水質を観測井で監視するという方法によって行った。すなわち、地下水の流速が本工事の揚水井戸に最も近い掘削溝の流速と近似するように試験工事の揚水量を1t/minと設定し、図-5.4のような揚水井戸、観測井戸、掘削溝の配置とした。掘削に用いた安定

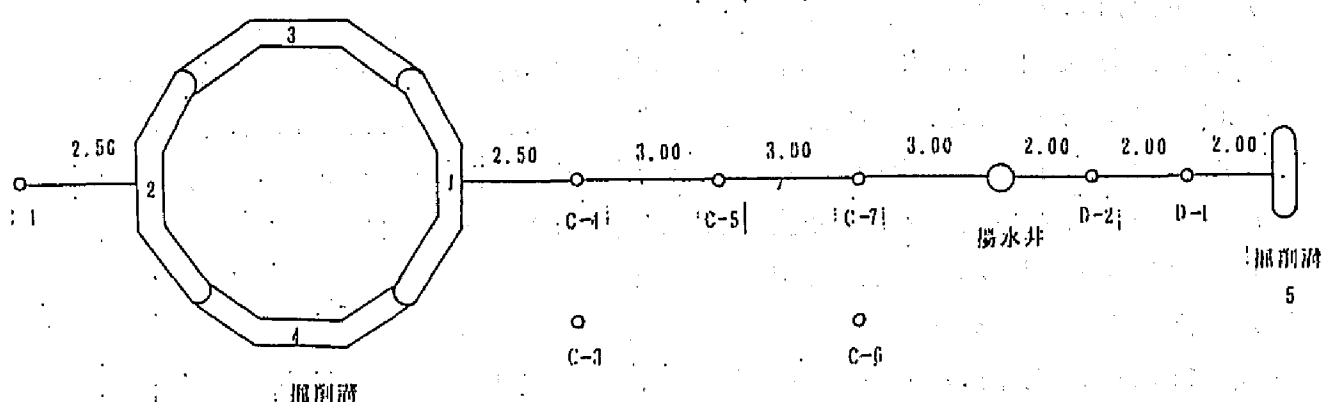


図-5.4 掘削溝と観測井の配置(O印が観測井)

表-5.2 水質試験項目と方法

項 目	試験方法(出典)	定量下限値	試験方法(概略)
塩素イオン	上水試験方法 35.2	0.1mg/l	硝酸銀法
過マンガン酸カリウム消費量	上水試験方法 15.2	0.1mg/l	酸性法
pH	上水試験方法 11.3	0.1	ガラス電極法
臭気	上水試験方法 9.2	—	臭気の種類判定
味	上水試験方法 10.2	—	味の種類判定
色度	上水試験方法 7.2	1度	白金・コバルト法
カルシウム	上水試験方法 45.2	0.1mg/l	原子吸光光度法
全蒸発残留物	上水試験方法 27.2	1mg/l	重量法
濁度	上水試験方法 6.3.3	1mg/l	積分球式光度法
EC (25℃)	上水試験方法 6.3.3	1μS/cm	偏位法

液、掘削機は本工事で予定したものと同様とした。掘削の規模は深さと壁厚は本工事と同じとし、掘削パネルの数は5個とした。

ii) 地下水水質の監視

水質は掘削期間中および掘削終了後3ヶ月以上にわたり、観測井戸および揚水井戸について測定した。測定項目と方法は表-5.2に示すように、主に上水の試験に準じた。なお、水質試験用の試料は観測井戸から真空ポンプによって吸引して採取したが、一部の水質項目(濁度、PH、電気伝導度)については観測井戸内にセットしたセンサーによって連続自記記録させた。

iii) 掘削およびコンクリート打設

掘削に用いた安定液の調合を表-5.3に示す。安定液の品質管理はB型粘度計(東京計器製)によって行い、未使用液の粘度は20000-40000cpの範囲にあった。コンクリートの調合および打設方法は通常の地中連続壁工法の場合と同様とし、スランプは18-20cmの範囲であった。

表-5.3 安定液の調合

ポリマ-(OP-7)	0.5%
変質防止剤(PCMX)	0.02%
ゲル化剤	0.03%

3.2 試験工事の結果

i) 逸泥の状況

顕著な逸泥はほとんど見られず大半が $0.2\text{m}^3/\text{Hr}$ 以下であり、最大で $1.3\text{m}^3/\text{Hr}$ であった。逸泥量は安定液の粘度と関係があり、図-5.5に示すように掘削溝内の粘度が2000cp以下になると極端に多くなる。このため、掘削溝内の粘度は安全を見て10000cp以上になるように管理した。

ii) 掘削溝内の安定液の性状

図-5.6に安定液の粘度、比重、PHを示す。粘度は大半が10000cp以上であったが時々5000cp前後になることがあった。この場合、PHが8.0以下になっており、第三章で述べたように、OP-7のゲルがPH低下によって解ゲルすなわち粘度低下を生じる現象があらわれている。なお、未使用液のPHは9.0-9.5の範囲にあった。比重は未使用液では0.97-1.00の範囲にあるが、掘削溝内では1.02-1.08の範囲にあり、この値から計算により求められる掘削土砂の混入量は3-12%(W/V)である。

iii) コンクリート打設時に回収される安定液の性状

コンクリート打設時に回収された安定液の粘度、PH、比重を図-5.7に示す。この場合の安定液はミキサ-車から打設されるコンクリートによって置換されて押し上げられる安定液を採取したものである。図示したように、当初に回収される安定液は比重が小さく、粘度は25000cp-30000cp、PHは9.0前後である。コンクリート打設が進むにつれPH、比重ともに徐々に増大する。そして、最終コンクリートの段

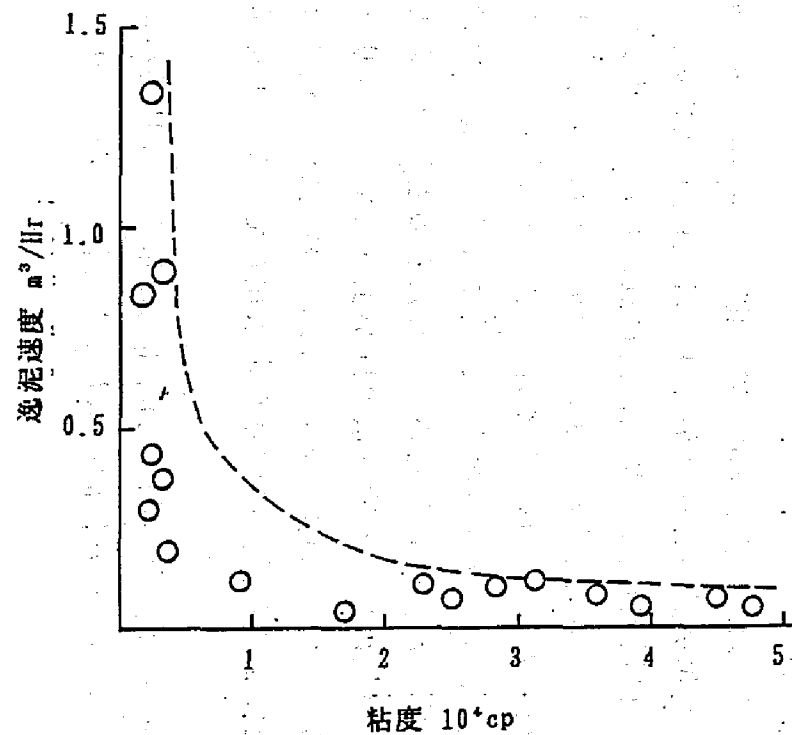


図-5.5 逸泥と安定液の粘度の関係

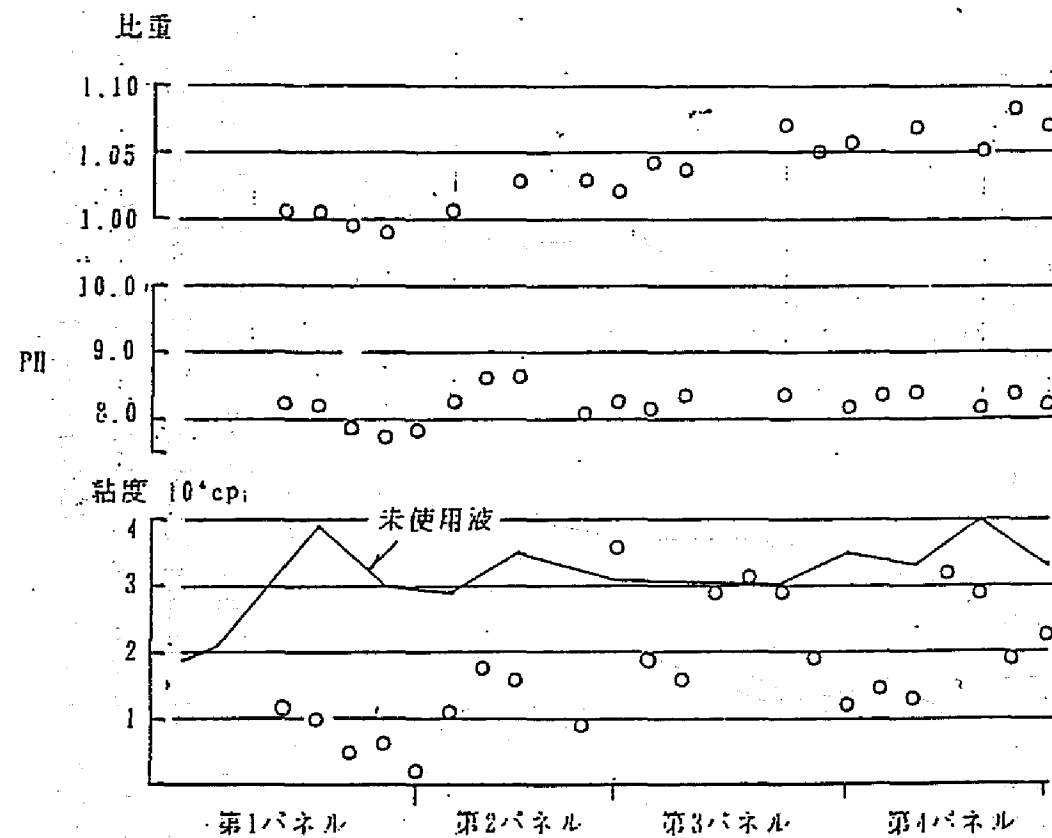


図-5.6 試験工事における安定液の性状(掘削溝内液)

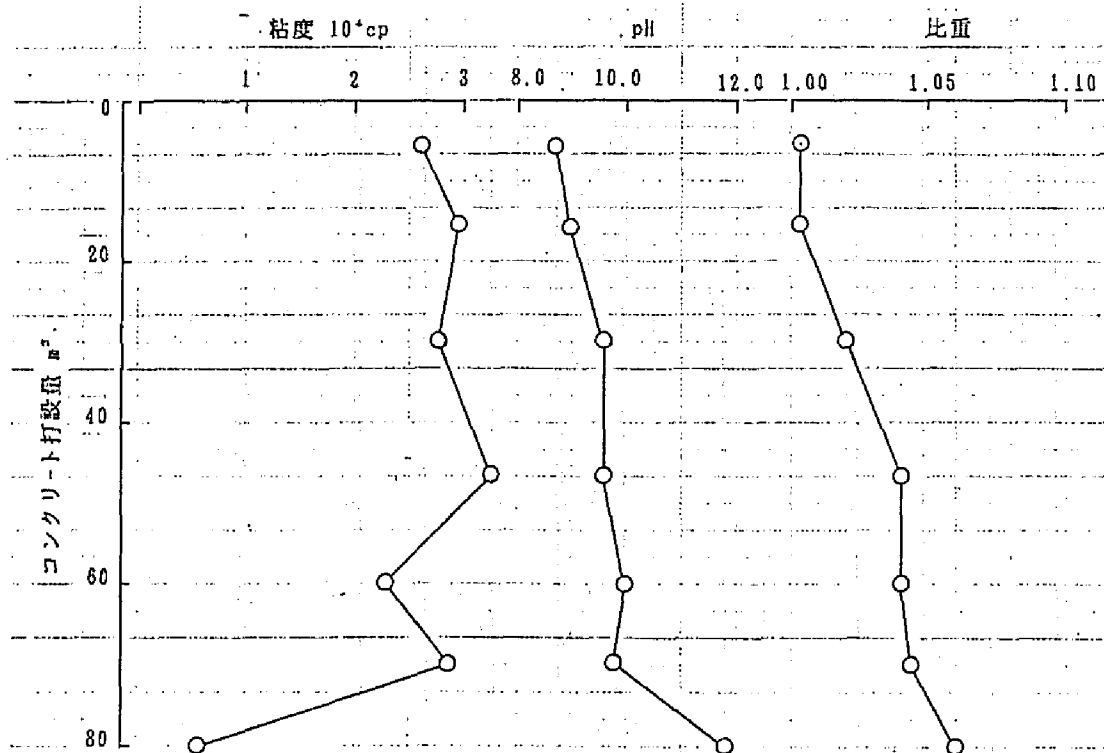


図-5.7 コンクリート打設時の回収液の性状(No.4パネル)

階では掘削溝の底部にあった安定液が回収されるが、この安定液は比重が1.06、PHが12近くになるとともに、粘度が5000cp前後に低下する。比重の増大は溝底に堆積していた土砂が押し上げられたことを示し、PHの上昇はコンクリートとの接触によるセメント成分の混入を示している。また、粘度の低下は土砂混入によるものと思われる。

3.3 地下水水質への影響

i) 施工中の地下水水質

揚水井および掘削溝に近接した観測井の水質の変化を図-5.8に示す。PHおよび電気伝導度にはほとんど変化が見られないが、濁度には明瞭な変化が見られる。すなわち、濁度は掘削の際に増大し、とくに掘削溝に近接した観測井では目視でも明らかな濁りが発生する。しかし、この濁りも掘削が終了しスライム処理やコンクリート打設の際にはほとんど認められなくなる。このような傾向から考えて、地下水の濁りは地盤掘削の際のバケットの上下運動による衝撃あるいは水圧の増大によって一時的に安定液が浸透したために生じたものと理解できよう。なお当初、コンクリート打設の際には周辺地下水のPHが上昇してアルカリ性になることが懸念されたが、測定値にはこの影響はまったく現れていない。これは、僅かに周辺地盤に浸透した安定液が溝壁の回りを止水化していることを示している。

つぎに、水質と掘削溝からの距離との関係を図-5.9に示す。掘削は5パネルについて行っているが、いずれも類似した傾向を示しており濁度およびCODは掘削溝

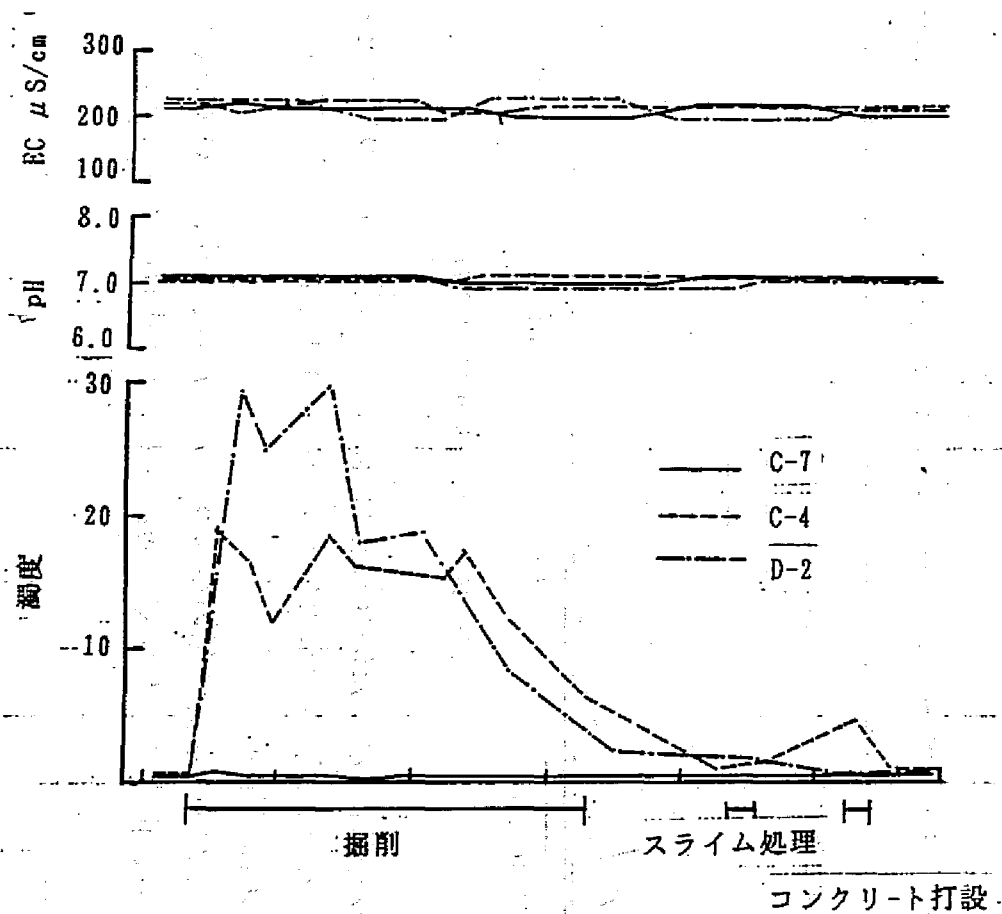


図-5.8 施工中の観測井の水質

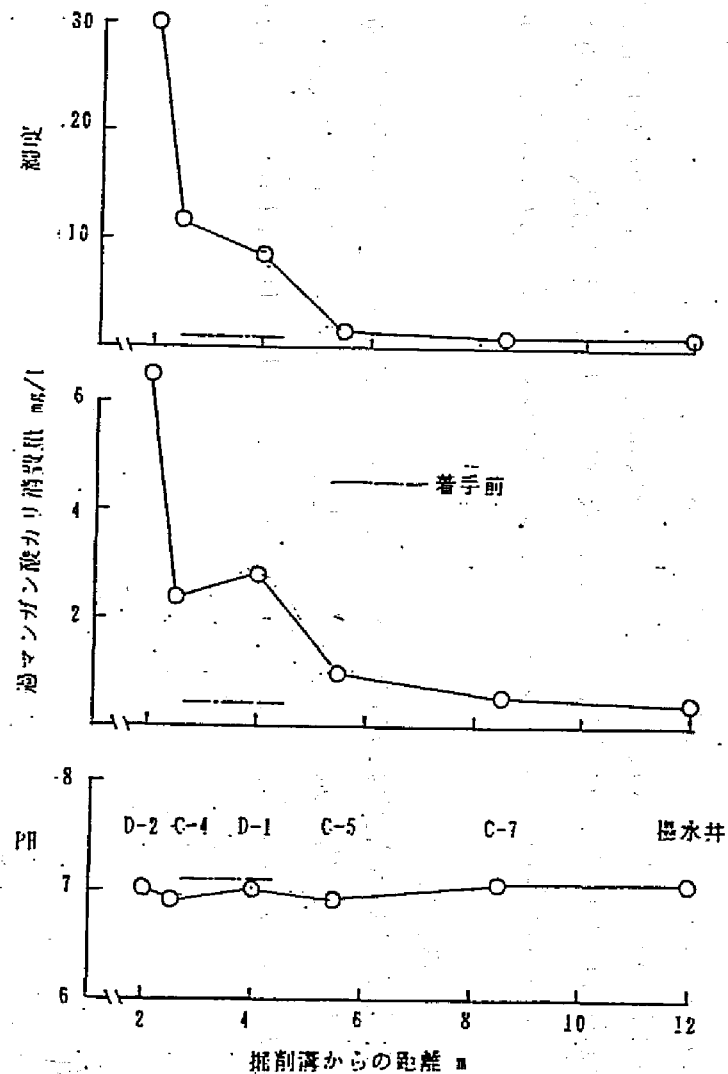


図-5.9 水質と距離の関係

から6-8mまでに影響が見られる。電気伝導度は図示していないが掘削溝に最も近い観測井に若干の影響があらわれることがあった。

各観測井にあらわれた水質影響をまとめると、水質影響が顕著なのは掘削溝から3.5m以内のD-2、C-3、C-4の観測井であり、水質項目としては濁度、過マンガン酸カリ消費量、CODである。これらの観測井では水道水基準をうわまわる汚染状態となる。

ii) 長期的な水質影響

若干の逸泥とはいえ地中に安定液が浸透したので、この安定液が地中で移動あるいは分解して長期的な水質汚染を招くことが懸念される。そこで、試験工事終了後4カ月間にわたって水質を監視した。その結果を図-5.10に例示する。掘削時

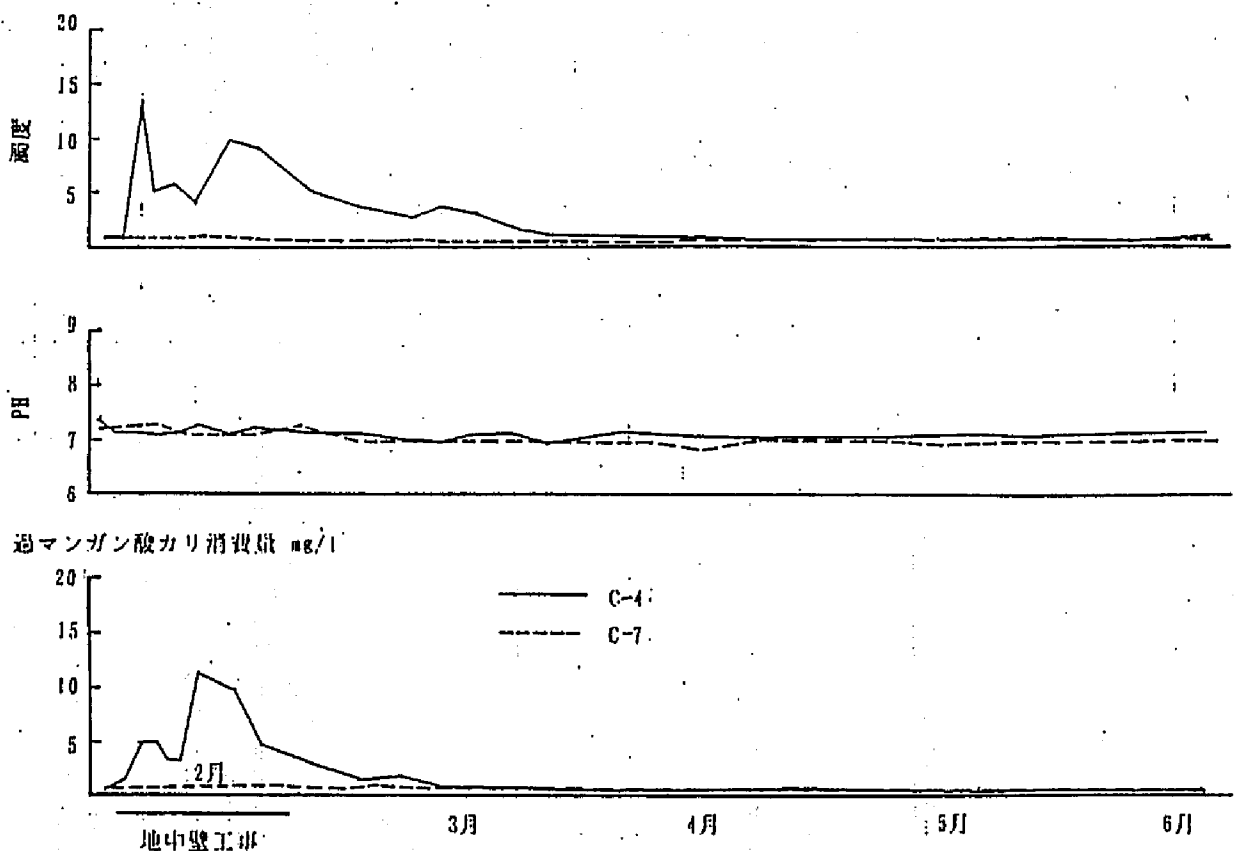


図-5.10 長期水質変化の例(C-4, C-7)

に汚染が顕著であったC-4の観測井においても試験工事の終了とともに濁度、過マンガン酸カリ消費量などは速やかに低下し、工事終了後約1カ月でほぼ工事前のレベルに回復する。

一方、掘削時の水質変化の少なかったC-7の観測井については、工事終了後も特に水質が悪化することなく当初懸念した長期的な水質影響はあらわれていない。

iii) 水質影響のまとめ

水質影響の最も顕著な工事中の観測井の水質監視の結果をまとめ模式的に示したものが図-5.11である。図のように、水質影響は揚水井の側でやや大きく、掘

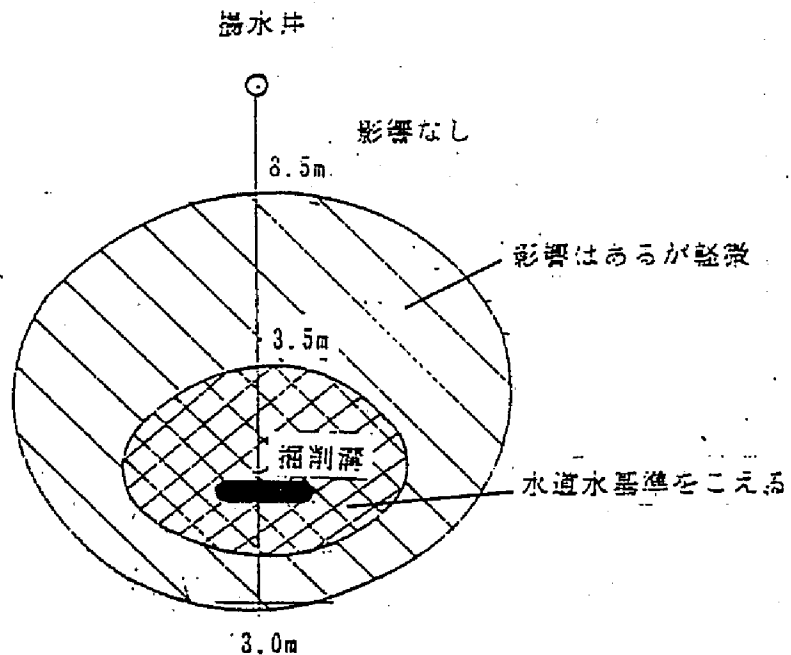


図-5.11 地下水汚染範囲の模式図

削溝から3.5mまでの範囲で水道水基準をこえる。軽微であるが影響を受けるのは掘削溝から8.5mまでの範囲である。揚水井の反対側では、掘削溝から3mまでの範囲が軽微な影響を受ける。以上の試験工事の結果により、本工事でも安定液の品質を十分に管理することにより、掘削溝から20m離れた揚水井戸の水質を悪化させることなく近くに地中連続壁を構築しうると判断した。

4. 本工事における逸泥防止と地下水水質の監視

4.1 地中壁の施工状況

i) 掘削およびコンクリート打設

掘削はバケット式掘削機(KELLY-40M)2台を用いて行われ、安定液は表-5.3に示した調合のものを使用した。この安定液は一回使用したら廃棄するのではなく、図-5.12にあるようにコンクリート打設時に回収したものをPH調節によって解ゲルし、安定液中の土砂を分離・除去して再びゲル化させ何回も使用した。掘削の際の溝壁の崩壊はほとんど見られず、コンクリート打設量の設計量に対する割り増し率も14-20%の範囲にあり良好な地中壁が築造されていることが示唆された。なお、掘削の際には座間市の水源井は平常通りに揚水を行ったが、最近接部の約

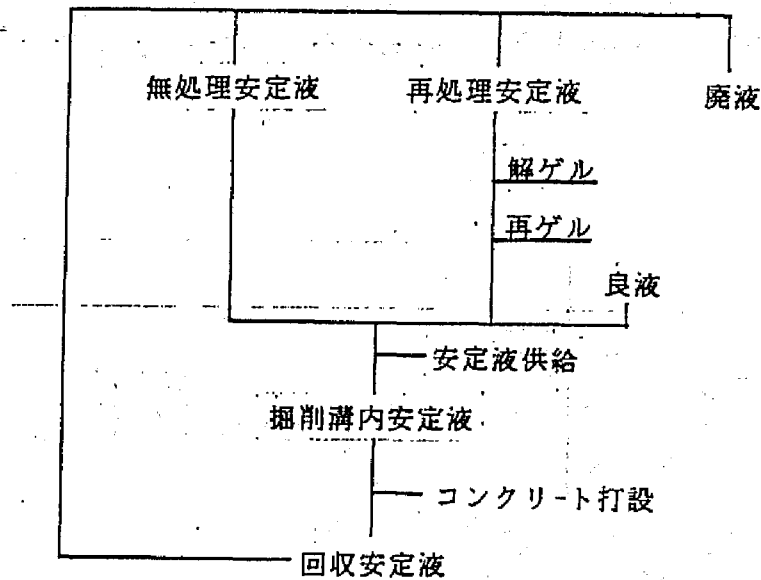


図-5.12 安定液の循環フロー図

25mの区間を掘削する時は万全を期して揚水を停止した。

ii) 安定液の性状

安定液の性状の垂直分布の例を図-5.13に示す。粘度は溝底を除いて15000-40000cpの範囲にあり、湿式燃焼法により測定したポリマ-濃度は0.33-0.4%であ

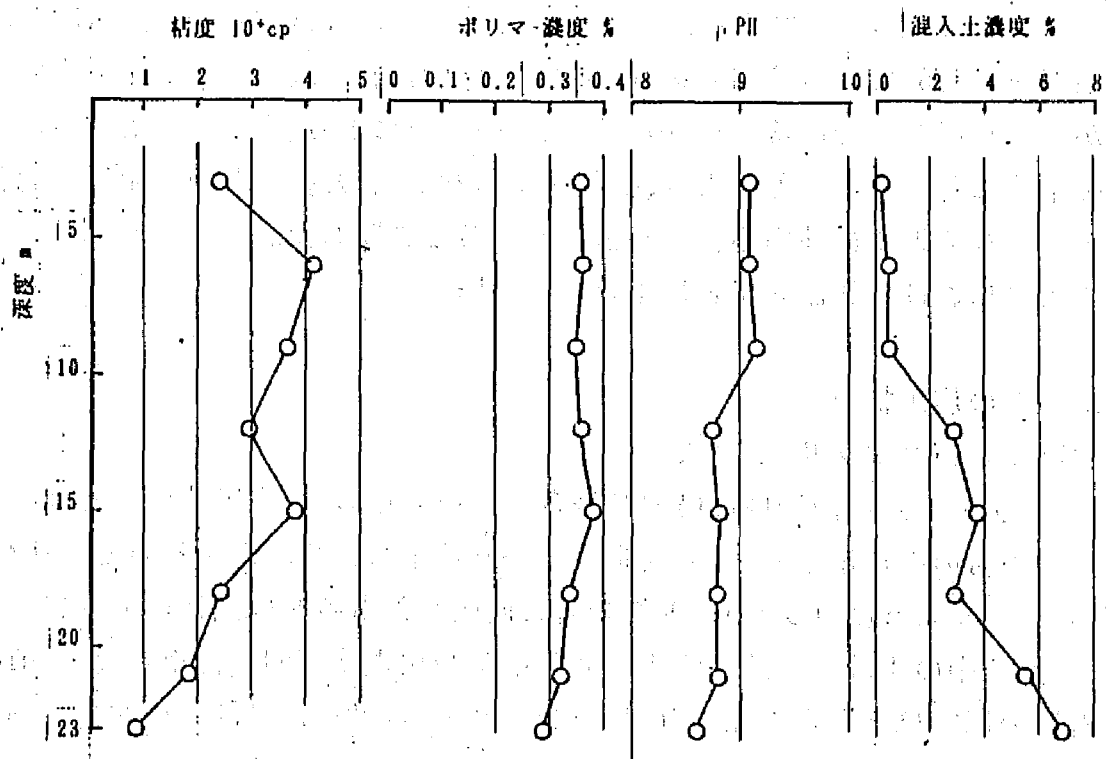


図-5.13 掘削溝内の安定液の性状の垂直分布

り、未使用液の70-85%である。混入土砂量は下部ほど多くなり、逆にPHは上部では9.2前後のものが下部では8.2まで低下する。溝底では粘度も低い、これは多量の掘削土砂の混入によるPHの低下とポリマ-濃度の減少によるものと思われる。

回収した安定液は、第三章に述べたOP-7ゲルのpH低下による解ゲル現象を利用して、酸(硫酸アルミニウム)を添加して粘度を低下させて混入土砂を沈降分離した。その後、アルカリ(水酸化ナトリウム)を添加し再びゲル化させて再使用した。安定液の再生過程の粘度変化を図-5.14に示す。

4.2 逸泥の状況

逸泥量は掘削を中断して掘削溝の安定液の液面低下量を測定して求めた。このような測定は何回もおこなったが、大半が逸泥量として表示すると $0.2\text{m}^3/\text{Hr}$ 以下であった。一方、表-5.4に示すように安定液の収支から求められる全逸泥量は 311m^3 であり、これは作成した安定液量の7.7%に相当する。この表は工事の中間段階で集計したもので安定液の作成量、残留量から損失した安定液の量を求め、損失量は劣化して場外に廃棄した量、掘削土砂に混入して場外に搬出された量、逸泥により地盤に浸透した量とで構成されるとして逸泥量を計算によって求めている。この計算では土砂に混入して場外搬出される量を仮定しているが、いくつかの採取試料の測定結果にも

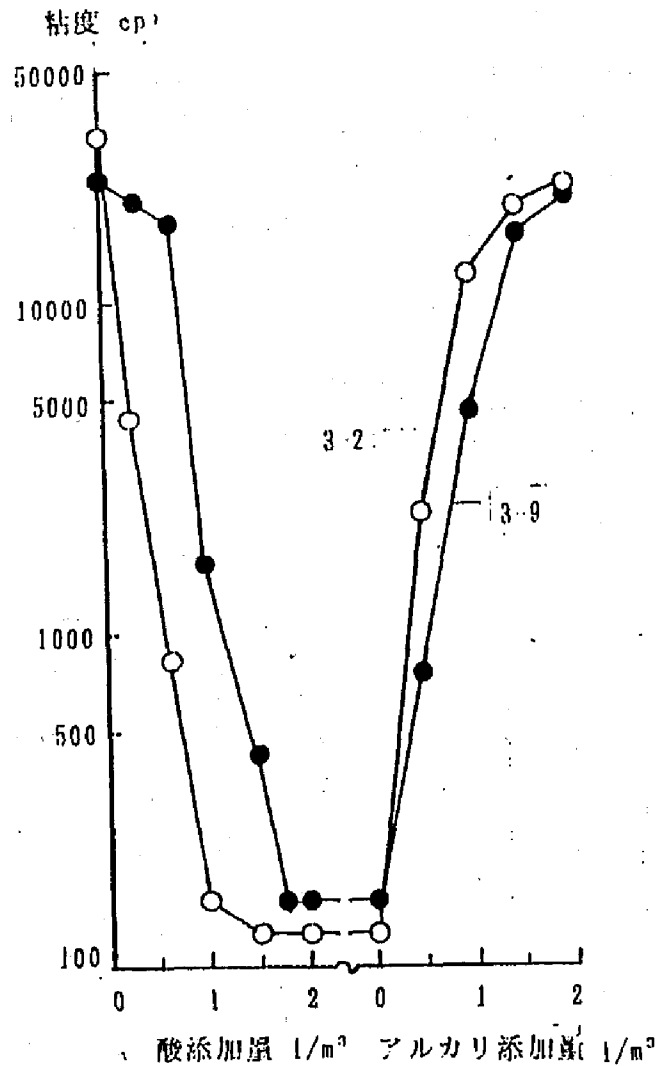


図-5.14 安定液の解ゲル・再ゲル

表-5.4 安定液の収支(単位は m^3)

A 掘削土量	1360
B 安定液作成量	1300
C 残留量	373
D 廃棄量	515
E 土砂とともに場外に搬出した量	311
F 逸泥量 (B-C-D-E)	101

とずき、搬出土砂の20%としている。このようにして求めた逸泥量は全工事期間の平均的な値と考えられ、この値から作業時間当たりの平均逸泥速度を求めると $0.1\text{m}^3/\text{Hr}$ となり、逸泥はほぼ完全に防止できたといえる。

4.3 地下水水質への影響

i) 水質の監視体制

水源井への影響を監視するため、水源井と掘削位置の間に2本の観測井を、また地中連続壁の内側と外側に観測井を新たに設けるとともに、試験工事に用いた観測井、揚水井についても定期的に水質を監視した。これらの観測井の配置を図-5.15に示す。水質監視項目としては濁度、過マンガン酸カリ消費量を中心に適宜選択した。

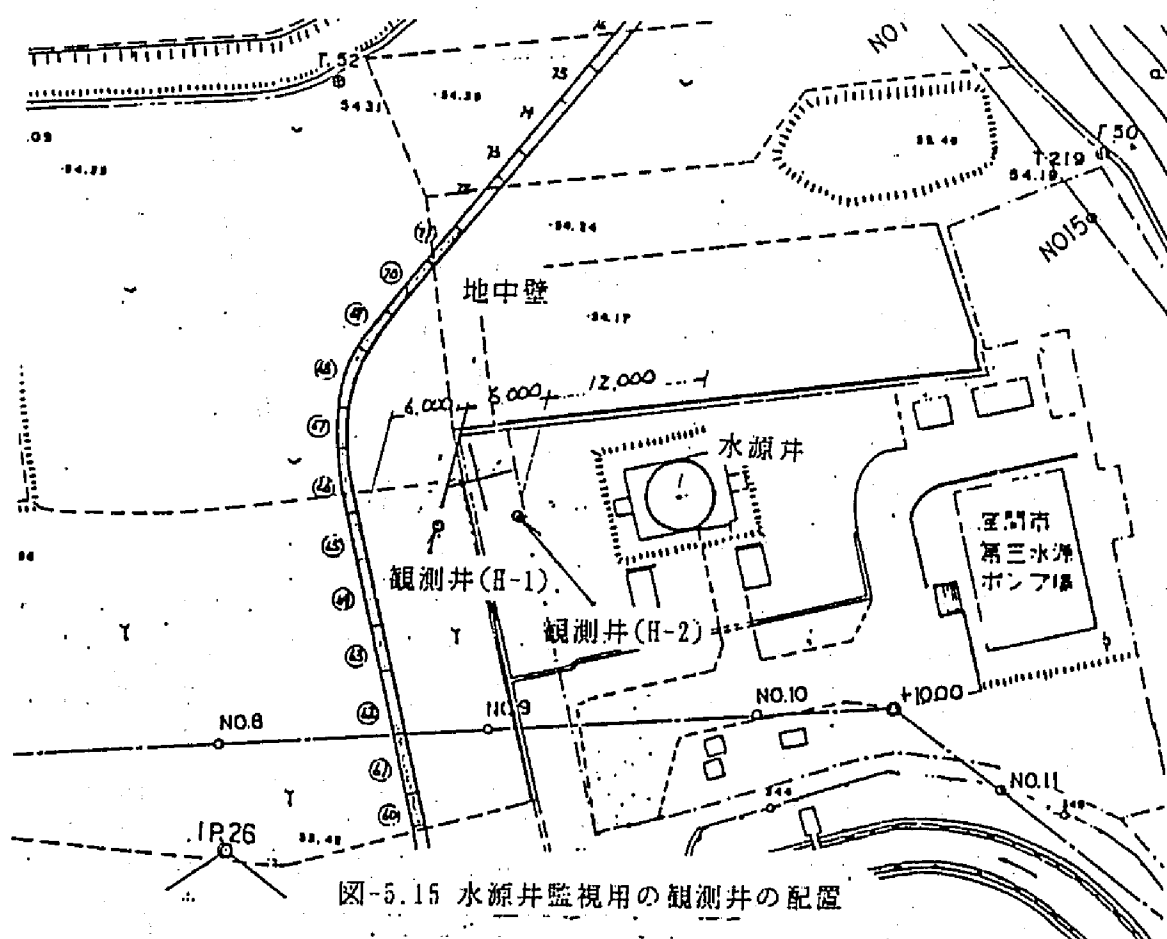


図-5.15 水源井監視用の観測井の配置

ii) 一般部施工時の水質

工事着手前の水源井、揚水井の水質を表-5.5に示す。当然のことながら、いずれの項目も水道水基準を満足している。次に、工事中の各観測井の水質分析結果の例を表-5.6に示す。BW-1を除く観測井では安定液の影響があらわれやすい濁度、過マンガン酸カリ消費量に変化は見られないが、BW-1では色度、濁度、過マンガン酸カリ消費量が増大しており、特に色度、濁度は水道水基準をやや上回る。こ

表-5.5 工事着手前の水質

	水源井	揚水井
PH	6.7	7.2
過マンガン酸カリ消費量 mg/l	1.2	1.2
濁度	0	0.5
色度	0	1
カルシウム mg/l	26.7	29.5
塩素イオン mg/l	16.4	14.7
全蒸発残留物 mg/l	273	190
TOC mg/l		0.5
EC μ S/cm	270	215

表-5.6 工事中の観測井の水質

	E-1	E-2	BW-1	水道水基準
PH	6.7	7.1	6.7	5.8-8.6
過マンガン酸カリ消費量 mg/l	2.4	6.4	5.8	10
濁度	1.7	1.5	4.0	2
色度	0	3	6	5
カルシウム mg/l	32.6	30.0	38.8	—
塩素イオン mg/l	12.4	13.7	7.6	200
全蒸発残留物 mg/l	198	177	195	500
EC μ S/cm	259	198	250	—

の原因は不明であるが、BW-1の設置された場所がやや低く、雨水や工事排水が溜まりやすかったためこれらの汚水が流入あるいは浸透したことも考えられた。

iii) 水源井近接部を施工した際の水質

水源井に最も近接した部分の約20mの区間を施工した際には、万全を期して揚水を停止し、掘削溝と水源井の間の二本の観測井によって水質を監視した。この区間の施工には約二カ月を要したが、この間観測井の水質には何の変化も見られなかった。また、施工終了後の揚水再開の際には、当初若干の濁度の上昇が見られたものの、他の水質項目には特に変化は見られず、揚水が定常状態になると揚水停止前と同様の水質に回復した。

6. おわりに

飲用を含む生活用水として地下水が利用されている地域の日量約5000tを揚水する水源井の極く近くで施工された地中連続壁工法における地下水水質の汚染防止の事例を紹介した。ここでは次のような手法を用いて地下水汚染を防止した。すなわち、①逸泥防止能力の高いGuar Gumゲル(OP-7)を採用した。②現場の条件と近似する条件下での試験工事を行った。③多数の観測井を設けて水質変化を監視した。④施工の際には、安定液の品質とくに粘度を入念に管理した。その結果、水源井の水質を全く汚染することなく工事を終えることができた。この事例は今後も予想される地下水の豊富な地域における地中連続壁工事の設計・施工に大いに参考になるものと思われる。

第三部 薬液注入工法における注入効果推定法の開発

第一章 本研究の背景とねらい

1. はじめに

第一部第一章で述べたように、地盤の止水性、強度を向上させる工法のひとつとして薬液注入工法は位置づけられ、その簡便さおよび適用範囲の広さによって広く採用されている。本章では薬液注入工法の設計・施工の概要を述べ、本工法の技術的課題を考察するとともに、本研究でとりあげる注入効果推定法に関する既往の研究を紹介し、残された課題を明らかにする。

2. 薬液注入工法の現況と課題^{40,41}

2.1 薬液注入工法の用途⁴²

注入工法には広義にはセメントミルク注入工法なども含まれ、岩盤への注入であるダムのカーテングラウトやコンソリデーショングラウトに用いられる。しかし、本研究では狭義の注入工法である地盤注入工法すなわち薬液注入工法を考え、現在一般的に用いられている水ガラスを主材とする薬液注入工法について技術の現状を述べる。本工法は図-1.1に示すように、開削工法の場合の止水、底盤のヒービング、ボイリングの防止やシールド工法における掘削切羽からの湧水、土砂流出の防止および地上構造物の沈下・倒壊の防止などを目的とした地盤改良に用いられている。この工法は他の工法のような大掛かりな設備・装置を必要としないため、狭い作業スペースでも施工が可能であり、また効果が早く現れるため緊急対策としても有効であるなどの理由から広く普及している。

2.2 薬液注入工法における設計・施工の手順

本工法の計画・設計・施工は図-1.2のようなフローに沿って行われる。まず、地盤改良の目的を明確にすることに始まり、改良すべき地盤の状態(土層構成および連続性、改良対象土の粒度、透水係数、地下水位など)、施工条件(作業スペースの広さ、周辺の建物の有無、地下水利用の状況、改良対象部の深度など)、許容される期間などを調査する。つぎに、目的を達成するための地盤改良目標値

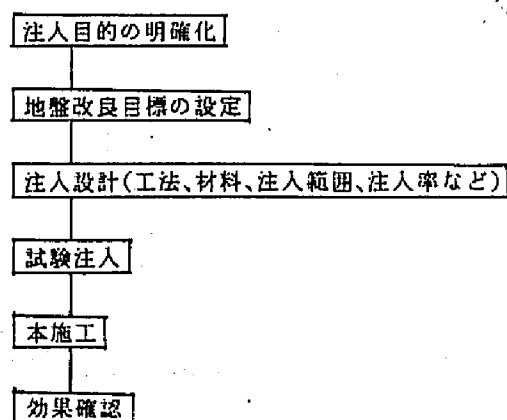
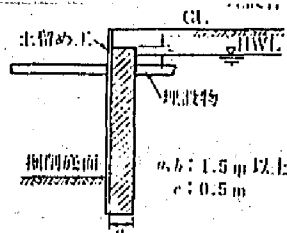
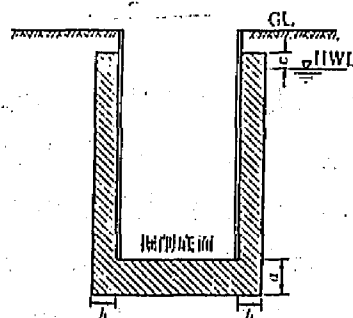


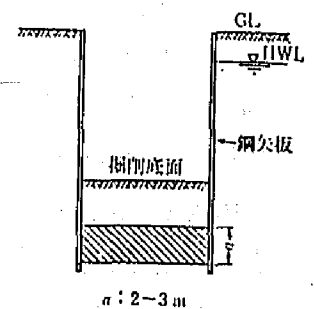
図-1.2 注入工事のフロー



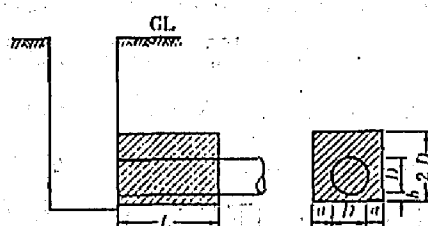
土留め不連続部の改良範囲 (例)



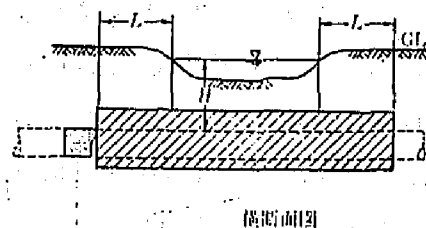
地下水位下で深礎掘削を行う場合の改良範囲 (例)



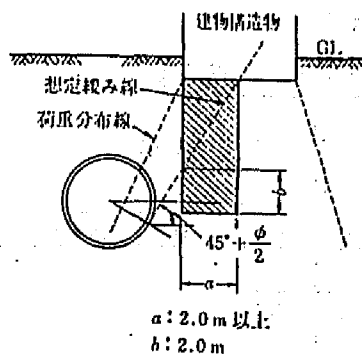
底盤注入の改良範囲 (例)



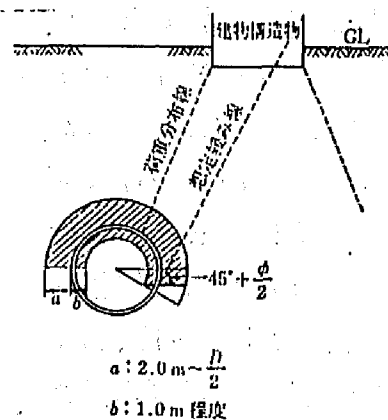
発進部・到達部の改良範囲 (中口径シールドの例)



河川横断部防護注入 (中口径シールドの例)



構造物の支持地盤を強化する防護注入 (中口径シールドの例)



シールド周辺地盤を強化する防護注入 (中口径シールドの例)

図-1.1 薬液注入工法の用途

を設定するとともに改良範囲を明確にする。このように設定された目標を確実にかつ効率的に実現する注入工法、注入材料を選択し、対象土の間隙率および注入材による間隙のてん充率から次式により注入率を設定する。

$$\lambda = n \cdot \alpha \cdot (1 + \beta) \cdot \dots \cdot (1)$$

ここに、 λ :注入率(%)

n :対象土の間隙率(%)

α :注入材による間隙てん充率

β :損失係数

(1)式により得られる注入率を注入対象土量に乗じることにより注入量が求められる。注入設計に用いられる n, α, β の例を表-1.1⁴⁾に示す。

表-1.1 各土質のてん充率、注入率(参考値)

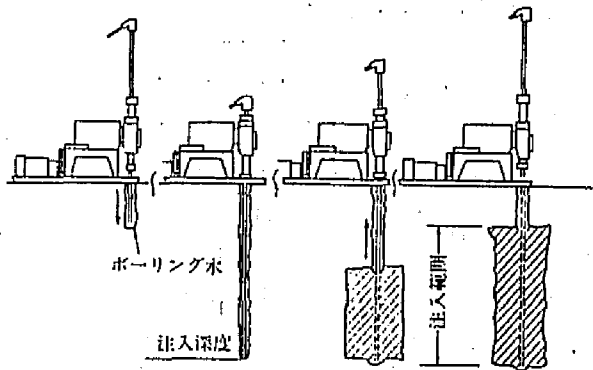
土質		N 値	透水係数 (cm/s)	間隙率 (%)	填充率 $\alpha(1+\beta)$ (%)			注 入 率 $n \cdot \alpha(1+\beta)$ (%)		
					注入材種別	注入目的別		注入材種別	注 入 目 的 別	
						強化	止水		強 化	止 水
砂	ゆるい	4~10	10^1	45~50	懸濁液系	95	100	懸濁液系	43~48	45~50
					溶 液 系	—	100	溶 液 系	—	45~50
	中位の	10~30	10^0	35~40	懸濁液系	95	—	懸濁液系	33.3~38.0	—
					溶 液 系	90	100	溶 液 系	31.5~36.0	35~40
礫	密 な	30~50	10^{-1}	30~35	懸濁液系	90	—	懸濁液系	27.0~31.5	—
					溶 液 系	90	95	溶 液 系	27.0~31.5	28.5~33.3
砂質土	ゆるい	4~10	10^{-2}	45~50	溶 液 系	90~95		溶 液 系	40.5~47.5	
	中位の	10~30	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	40~45	“	90~92		“	36.0~41.4	
土	締まった	30~50	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	35~40	“	80~85		“	28.0~34.0	
粘性土	ゆるい	0~4	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	60~75	懸濁液系	40	—	懸濁液系	24~30	—
					溶 液 系	45	—	溶 液 系	27~34	—
	中位の	4~8	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	50~60	懸濁液系	30	—	懸濁液系	15~18	—
					溶 液 系	30	—	溶 液 系	15~18	—
腐植土	0~5	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	70~90	懸濁液系	60		懸濁液系	42~54		
				溶 液 系	—	100	溶 液 系	—	70~90	

- 注) 1. 土質調査結果、N値、透水係数、間隙率が上表の区分より異なる場合は、間隙率を優先させる。
 2. 間隙率が不明確な場合はN値より推定する。
 3. 損失係数 β は0.1とした値である。なお、 β は現場注入試験の結果定めるのがよい。
 4. 注入目的の重要度でてん充率を考慮する。
 5. 他の工法などで施工され乱れている場合には、てん充率を大きくする。

設計された注入工法(工法、材料、注入率など)が妥当なものであり所期の地盤改良が可能であることを本施工の前に確認する必要がある場合には原位置であらかじめ試験注入を行う。この場合、試験注入した地盤でボーリングを行い地盤の強度や透水係数を調査し、注入前の値と比較することにより注入効果を確認する。また、すでに対象地盤での施工実績が豊富な場合には試験注入を行わずに本注入を行う。いずれの場合にも注入による地盤改良効果が十分であること

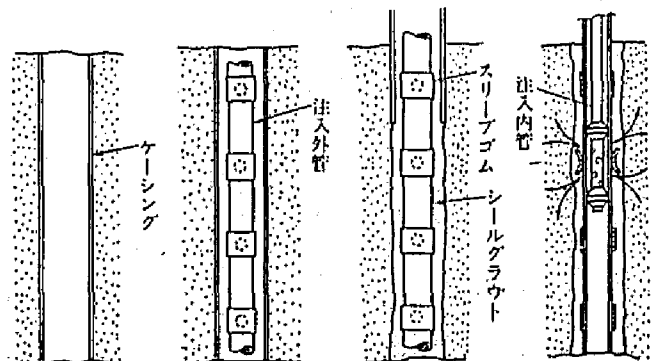
表-1.2 注入方式の種類

注入管の構成	注 入 方 式	ゲル化時間	注入材の混合方式
単 管	単 管 ロ ッ ド	急 結 (数分)	1.5ショット
	単 管 ス ト レ ー ナ ー		
多 重 管	二重管ダブルパッカー	緩 結 (数10分)	1ショット
	二 重 管 単 相	瞬 結 (数10秒以下)	2ショット
	多 重 管 複 相	瞬結+ {急結 緩結}	2ショット+ {1.5ショット 1ショット}



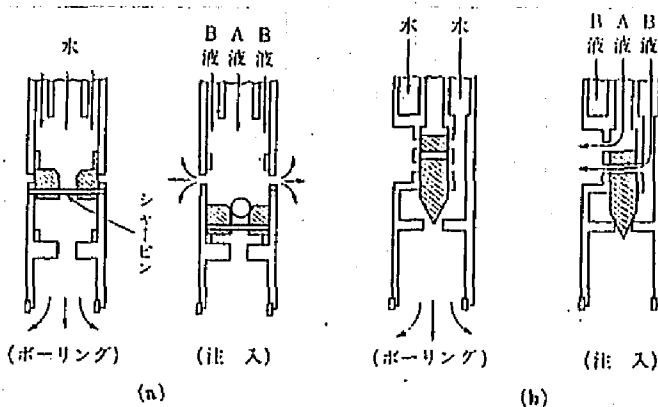
① 削孔開始 ② 削孔終了 ③ ステップアップ注入 ④ 注入終了

A 単管ロッド注入施工順序図

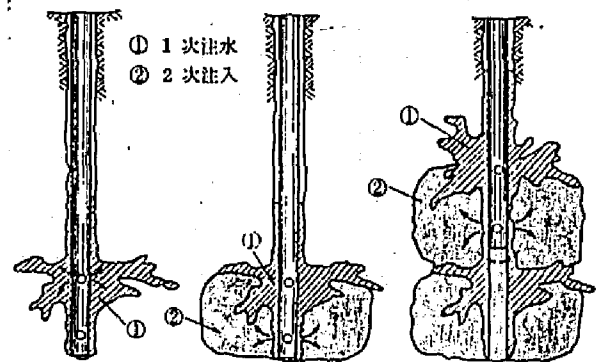


① ボーリングによりケーシング挿入 ② 注入外管挿入 ③ シール材充てん、ケーシング引き抜き ④ 注入内管挿入、注入

B 二重管ダブルパッカー注入方式による施工順序図



C 二重管単相注入方式用注入モニターの構造例



(a) 瞬結1次注入 (第1ステップ) (b) 緩結2次注入 (第1ステップ) (c) 第2ステップ注入

D 多重管複相注入方式の概念図

図-1.3 各注入工法の注入概念図

を確認しながら、次工程すなわち地盤掘削を行う。

2.3 注入工法の施工法

注入は基本的には次の工程にしたがって行われる。

- ① ボーリング機械による削孔
- ② 注入管のセット
- ③ 注入薬液の混合・調整
- ④ 注入薬液の圧入

これらの工程のうち①と②が同時に行われる場合もあり、また③と④が同時に進む場合もある。現在普及している注入工法には表-1.2のようなものがあり、注入材のゲルタイムによって工法が異なる。いくつかの工法について手順あるいは薬液の混合方式を図-1.3に示す。

2.4 注入薬液の材料

注入薬液の開発は1886年にさかのぼると言われるが、実際に注入工法として施工に用いられたのは1925年のJoosten(オランダ)の特許によるものである。この時の材料は水ガラス(ケイ酸ナトリウム)溶液を塩化カルシウムでゲル化させるものであった。以後、硬化剤は各種のものが開発されたが水ガラスを主材とするものが主流であり、我が国でも大正年間から水ガラス系のものが用いられてきた。水ガラス系の注入材の欠点といわれたシルト、細砂への浸透性の欠如を解決したのが、アメリカで開発され、昭和30年代に我が国にも普及したアクリルアミド系の注入材である。この注入材は粘性が水とほとんど変わらないため、極めてすぐれた浸透性を有し、しかもゲル化時間の調節が容易であり、耐久性にもすぐれていた。この材料の出現に刺激されて、ほかにも尿素系やウレタン系などの高分子系注入材が開発され、広く普及した。

ところが、1970年代になると高分子系注入材の優れた性能を過信して無理な施工を行った結果、未反応の注入材が周辺の井戸に入り地下水を汚染する事態が発生し住民の健康障害を招くに至った。このため、建設省により「薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針」⁴⁴が通達され、これによって我

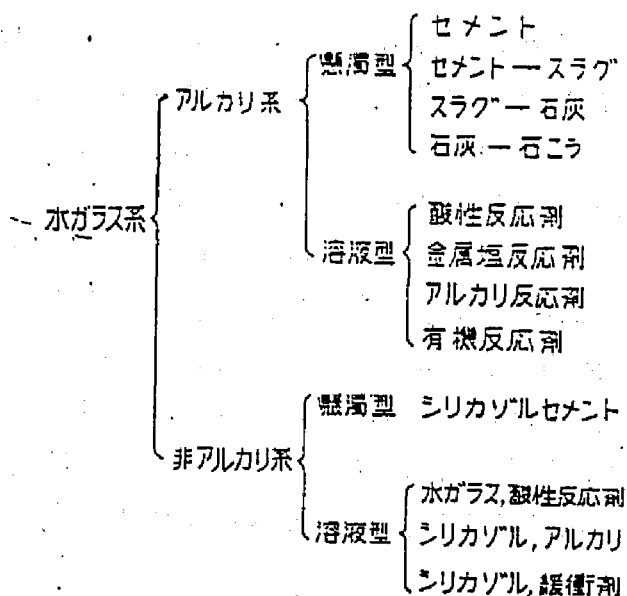


図-1.4 水ガラス系注入材の分類

が国では水ガラス系の注入薬液以外には使用することができなくなり、現在もこの状態が続いている。その後、水ガラス系注入材の改良が進み、現在では図-1.4^{4,5}に示すように各種のものが開発・実用化されるに至っている。これらの注入材は対象地盤、注入工法の種類、必要とされる地盤改良効果などに応じて選択されている。

2.5 注入工法の課題^{40,41}

薬液注入工法は簡便かつ即効性のある地盤改良法として広く普及し、特に最近では施工法、注入材料の改良も著しい。しかし、この工法はなお多くの課題を残しており、その代表的なものには次のようなものがある。

- ① 地盤改良効果の確実性の不足
- ② 注入材による地下水の汚染
- ③ 注入材からの溶出成分による地中構造物の劣化
- ④ 地盤改良効果の持続性あるいは注入材の耐久性の不足

①は注入材の地中での挙動が十分に予測できず、また注入した地盤の改良効果を確認する適切な方法が確立されていないことに起因している。このため、改良を要する所に注入材が十分に浸透していなかったり、あるいは予想外の場所に注入材が漏出しても把握できず、その結果期待どおりの効果が得られないという事態が発生する。このような現状を改善することは薬液注入工法の信頼性を向上させるために不可欠と考えられる。

②および③は注入材料あるいはその溶出成分による周辺への影響に関する事項である。一応、前述の暫定指針によって地下水汚染の少ない水ガラス系の注入材のみが使用され、また地下水水質の監視が義務づけられているが、より安全性の高い材料の開発はなお必要である。また、地下のコンクリート構造物などへの影響⁴⁶については従来あまり問題にされていないが、注入材に含まれることのある硫酸根などは地下水に溶出し、濃度によってはコンクリートを侵食するので注意が必要であり何らかの対策が必要になるものと思われる。

④は注入による地盤改良を現在のように一時的なものでなく、長期的あるいは恒久的なものにするためにはネックとなる点である。この点が改良されれば注入工法は信頼性の高い、より経済的な地盤改良法となろう。そのためには材料、施工法、施工管理などの多岐にわたる改良が必要とされる。

3 薬液注入工法における施工管理--効果確認の方法--

3.1 効果確認の意義

いかなる施工法を採用するにせよ、施工が計画どおりに行われ設計で期待した目標を達成していることを確認するための施工管理が必要がある。例えば、コン

クリートを打設する場合にはコンクリート作成プラントでセメント量や空気量が測定され、現場でもスランプや空気量の試験が行われさらに圧縮強度試験のための抜き取り検査が行われる。薬液注入工法の場合にも地盤改良効果を保証するためにはこのような施工管理が期待されるが、注入薬液の浸透および薬液の硬化反応が地盤内の間隙で生じるため目視することができず試験のための試料採取も思いどおりには行かない。また、たとえ試験をしても複雑な地盤構成の地下の全体を代表するデータとはならない場合が多い。このため、実際には注入の際の注入圧、注入した薬液の数量を記録して施工管理の一助としている。このため、注入工法は技術ではなく芸術であるとさえ言われている。

このような現状を脱却し薬液注入工法を職人芸から工学に発展させるには注入効果を確認する手法の確立が不可欠であり、従来から各種の方法が検討されているが実用に供しうる手法は未だに見いだされていない。効果確認手法の開発は実際上は次のような意義を有する。

- ① 注入工法における品質保証(信頼性の向上)
- ② 注入効果不良による事故の防止
- ③ 注入工法のコストダウン
- ④ 設計・施工の合理化

3.2 注入効果の確認に関する既往の研究⁴⁷

薬液注入工法の効果を確認する方法として実用化されているものおよび提案されているものを表-1.3に示す。ここに示された方法のうち、Bの削孔による方法は注入の後にボーリングを行って効果を確認するものであり、注入範囲内に多数のボーリングをして各種の試験を行えば確実な方法である。しかし、実際にはボーリングおよび試験に要する費用あるいは工期の制約があり、十分に行える状態にはない。Cの掘返し試験についても同様である。したがって、これらの方法は常時かつ数多く行う試験ではなく、より簡便な効果確認方法を補足する試験として位置付けたほうがよいものと思われる。

表-1.3 薬液注入工法の効果の確認方法

A 非破壊判定試験	
(a) 注入範囲を探るもの	<ul style="list-style-type: none"> イ RIによる方法 ロ 電気探査による方法 <ul style="list-style-type: none"> ・電気比抵抗 ・電気抵抗 ハ 弾性波による方法 ニ トレーサーによる方法 ホ 磁性による方法
B 削孔による判定試験	
(a) 注入範囲を探るもの	<ul style="list-style-type: none"> イ 試料採取 <ul style="list-style-type: none"> ・視覚・臭覚・触覚による方法 ・機器分析による方法 ロ 電気検出による方法
(b) 強度特性を探るもの	<ul style="list-style-type: none"> イ 貫入試験による方法 ロ 孔内加圧変形試験による方法 ハ 孔径検出による方法 ニ 試料採取による力学試験による方法
(c) 止水効果を探るもの	<ul style="list-style-type: none"> イ 透水(透気)試験による方法 ロ トレーサーによる方法
C 掘返し試験	
・削孔による判定試験と同じ	
D 室内試験	
・現場試験の補充	

削孔をしない非破壊判定試験には表-1.3のAに示す各種のものが提案されている。これらはいずれも薬液の浸透範囲を探る方法であり、注入による地盤改良の程度を確認するものではなく間接的な方法といえる。したがって、試験結果と地盤改良程度とを関連づける必要があり、このために先のBおよびCの試験と併用することも考えられる。

ここに示した各種の方法の特徴を表-1.4^{*)}に整理して示す。ここでは、各方法の精度、即時性、簡便さの観点から評価をしているが、即時性とは判定がどの時点で行われるかに着目している。一

般に、注入による地盤改良は本工事に先だって行われ、本工事の時点には注入用の機材は撤去されることが多い。したがって、効果判定の結果、さらに補足注入が必要になった場合には工事が後戻りすることになる。このため、効果判定の結果は注入工事の最中あるいは直後に判明することが望ましい。この点では現在提案されている方法の大半が即時性に乏しく改良の余地を残している。

また、これらの方法による判定結果から地盤改良効果(強度増大、止水性の向上など)を推定するには、地盤内の注入材の分布(たとえばん充率の分布)が定量的に把握できることが望ましいが、現状では困難なものが多い。

4 おわりに

我が国における薬液注入工法の現状を概観し、注入材の耐久性の不足とともに施工管理手法、とくに地盤改良効果の確認方法に適切なものがなく、これらが本工法の発展のネックとなっていることを述べた。従来、開発あるいは提案されている各種の確認方法についても三つの観点(精度、即時性、簡便さ)から評価を加え、さらに改良の余地があることが判明した。これらを本研究の立脚点として、次章以降には、注入工法による地盤改良の実態、上にあげた三つの観点にたった新しい注入効果判定法の検討・開発経過、工事現場への適用結果などを述べる。

検査法		測定原理	精 度	簡 便 さ	即時性	総合評価
透 透 検 測		弾性流動	N値と対応 定性的	比較的簡単	事後調査用	既時調査用
P S 検 測		P波、S波の 伝播速度	・	・	・	・
反 射 検 測		音波の反射	固結形状推定 接近距離1.5m以内	・	・	固結形状推定
電気検測	比抵抗法	電気抵抗	てん充率推定可 漏分の妨害あり	電極の埋込み が必要	・	広域探索も可
	抵 抗 法	電気抵抗	浸透範囲検出	電極着埋込	注入中に推 定可	浸透形状推定
R I 検 測		密度・含水率	水ガラス注入では 低精度	放射線源必要	事後調査用	汎用性乏しい

表-1.4 注入効果判定法の評価

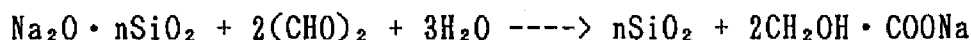
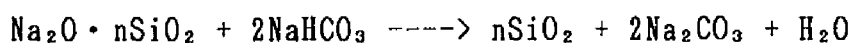
1 はじめに

注入地盤における地盤改良効果は地盤中の注入材の分布状態に支配されることが推察される。したがって、地盤改良効果を確認する簡便な方法を開発するにあたり、まず、注入材の分布を的確に把握することが先決であろう。この方法についても現状では適切なものではなく、このため注入土に含まれる注入材の測定法について検討した。幸い、第一章に述べたように現在注入材として使用を許可されているのは水ガラス系のものだけである。そこで、注入した水ガラス系注入材に由来し、地盤改良に直接寄与する成分であるケイ酸に着目し、注入材含有量の測定法を検討した。さらに、ここで確立された方法を室内実験で得た注入固結体に適用し、注入材の分布状況を明らかにするとともに、注入による効果と薬液の間隙てん充率との関係を検討した。

2 土中の注入材含有量の測定法^{4,9,50}

2.1 原理

水ガラス系注入材は水ガラス(ケイ酸ナトリウム)を各種の硬化剤によってゲル化または硬化させるもので、その反応は例えば次式のように表すことができる。



反応によって生成するケイ酸(SiO_2)あるいはケイ酸カルシウムなどのゲルあるいは不溶性成分が土粒子の間隙を充填することにより土の強度や止水性が向上することになる。したがって、注入土中の反応生成物の量を測定することができれば、その結果は注入による地盤改良効果と密接に関連すると思われる。

さて、上に示した反応の生成物であるケイ酸などのゲルは非結晶性であるのに対し、土中に多量に含まれるケイ酸は大半がケイ酸アルミニウムの形態の結晶性である。したがって、注入土の非結晶性のケイ酸を精度よく測定することができれば、注入材含有量を求めることが可能であろう。

ところで、土の非結晶性ケイ酸(シリカ)の測定は土壌学の分野では、土の肥沃度や生成過程を検討するために重要であり、いくつかの測定方法があるが特に Jackson・Hashimotoの方法⁵³が有名である。この方法は非結晶性のケイ酸の水中の溶解度がPHに支配され、PHが10.5以上では溶解度が著しく高くなること⁵⁴

に着目し、土試料をアルカリによって抽出するものである。

そこで、土をアルカリによって一定条件下で抽出し、抽出液のケイ酸を定量する方法を検討した。その際、この方法の成否を決める注入前の土で抽出されるシリカと注入材から抽出されるシリカの量に大きな差異があるかどうかを着眼点とした。

2.2 土および注入材の非結晶性シリカの定量

i) 非結晶性シリカの抽出

Jackson・Hashmoto法に準じ土あるいはホモゲルの湿潤試料の一定量を取り、10倍量の0.5N-NaOHを加えて混合したのち、ウオ-ターバス上に30分間放置して非結晶性のシリカを抽出した。この方法によりホモゲル中のシリカの全量を抽出しうるとは後に述べる。なお、硬化剤がセメントやアルミン酸ソーダのように金属イオンを含む場合にはシリカの抽出率が低下するので、アルカリ抽出に先立って酸による抽出を行い金属イオンを除去した。

ii) シリカの定量

抽出液はろ過(東洋ろ紙NO.5Aによる)した後、ろ液について原子吸光光度計によりシリカの定量を行った。

iii) 土および注入材の非結晶性シリカ

各種の土および注入材の測定値を表-2.1に示す。土は各地の砂、砂れき、シルト、火山灰などと人工的に調整した標準砂(豊浦産)、ケイ砂を試料としているが、人工的な砂では100mg/100g以下、沖積層の砂で150-300mg/100g、洪積層の砂で200-

表-2.1 土および水ガラス系注入材の非結晶性シリカ含有量

土		注入材	
標準砂(豊浦産)	47	重炭酸カリウム	10011
けい砂	58	アルミン酸ソーダ	9600
川砂(鬼怒川産)	222	硫酸水素ナトリウム	8700
沖積砂(東京)	230	エチレンカーボネート	9420
沖積砂(大阪)	210	グリオキサール	9300
洪積砂(東京)	240	トリアセチン	10400
洪積砂(東京)	380	セメント	13050
シルト(東京)	500	酸化マグネシウム他	9800
シルト(大阪)	480		
砂れき(神戸)	150		
砂れき(帯広)	82		
火山灰(赤土)	910		

単位はmg/100g

400mg/100gである。おなじく沖積層の砂でも試料採取地点や深度によってかなりのちがいが認められる。この点は洪積層の砂やシルトでも同様である。なお、測定した試料のなかでは火山灰が最大の値を示す。

一方、水ガラス系注入材のホモゲル(硬化体)については工事現場に出回っている各種のものを供試した。これらは、いずれもJIS3号の水ガラスと硬化剤を反応させたものであり、水ガラスの濃度は全体に対して25%としている。測定結果を見ると、セメントを硬化材とするものを除いて、アルカリで抽出されるシリカの濃度は8000-10000mg/100gの範囲にある。この値は用いた水ガラスに含まれるシリカの量にほぼ一致しており、ここで採用した測定法によって注入材中のシリカの全体を定量していることを示している。セメントを硬化剤とするものでは他のものに比べて高い値を示しているが、この場合にはセメント自身にも非結晶性シリカが含まれるので高い値を示すことになる。

土および注入材の非結晶性シリカを比較すると、砂や砂れきでは注入材の値の1/100から1/50程度の値であり、土と注入材の混合物とみなしうる注入土の非結晶性シリカを測定すれば、その大半は注入材に由来すると考えてよいと思われる。

2.3 注入材含有量(てん充率)の計算

土中の注入材の含有量の表示の方法としては単位体積の土に含まれる注入材の体積すなわち注入材含有率およびてん充率を求めるようにした。前者は注入設計に用いられる注入率と対応する。計算は次式を用いて行った。

$$y = \frac{x/\gamma_1}{x/\gamma_1 + (1-x)/\gamma_2} \times 100 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$x = a/a_1 - a_2/a_1 \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\alpha = y/n \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、y:注入材含有率(%)

γ_1, γ_2 : 注入材、土の比重

a: 注入土の非結晶性シリカ(mg/100g)

a_1, a_2 : 注入材、注入前の土の非結晶性シリカ(mg/100g)

α : てん充率

n: 注入前の土の間隙率(%)

そこで、湿潤土(川砂)とホモゲル(有機系硬化剤による)の混合物について非結晶性シリカを測定し(1),(2)の式を用いて注入材含有率を計算した結果を混合したホモゲルの体積率に対してプロットした。その結果は図-2.1に示すように、ほぼ1:1の直線が得られる。この結果は、ここで提案した方法によって注入材含

有率あるいはてん充率を測定することが可能なことを示している。

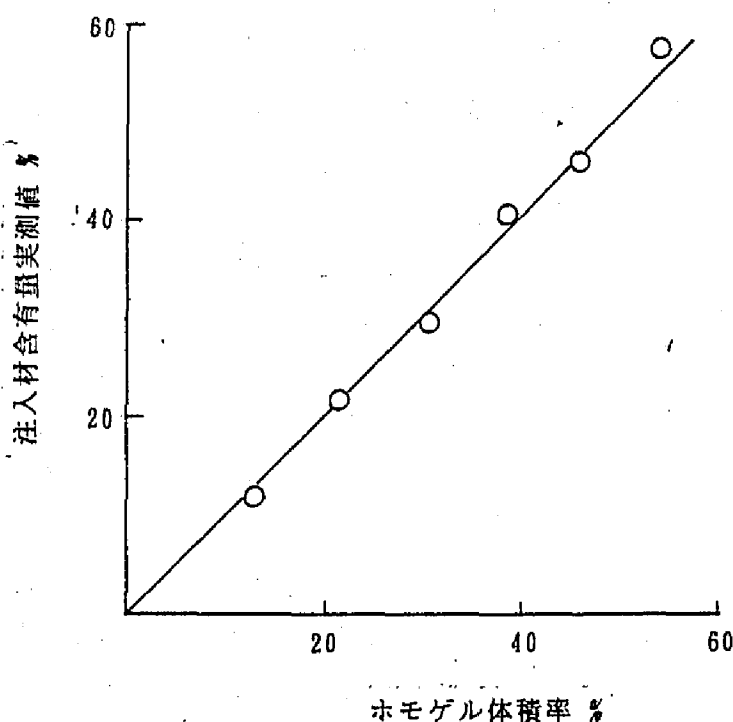


図-2.1 検量線

なお、この方法による注入材含有率あるいはてん充率の測定精度は次のような要因によって決まる。

- ① シリカの抽出、抽出されたシリカの定量の精度
- ② (1)式のホモゲルおよび土の密度の精度
- ③ (2)式の注入前の土の間隙率の精度

これらの要因のうち①②については5%程度、③については10%程度の誤差と考えられ、得られるてん充率の値は15%程度の誤差を示すと思われる。てん充率のこの程度の誤差は、例えばてん充率が50%の場合、プラスマイナス7.5%の誤差であり、注入による地盤改良効果を論じる際には無視しうるといえる。

3 室内注入土における注入材の分布

3.1 注入固結体の作成

i) 供試材料

砂：川砂(鬼怒川)および標準砂(豊浦産)を用いた。それぞれの粒径分布を図-2.2に示す。

注入材：懸濁型水ガラス系注入材(LW)および無機溶液型水ガラス系注入材を使用した。ゲルタイムは硬化剤の量によって調節し、5秒から31秒の範囲とした。

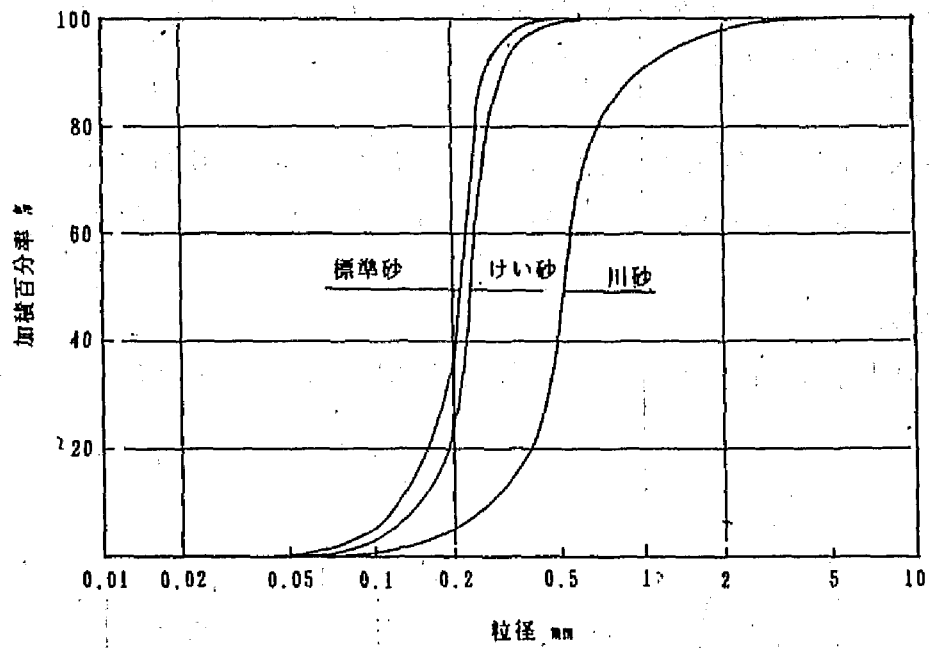


図-2.2 供試土の粒径分布

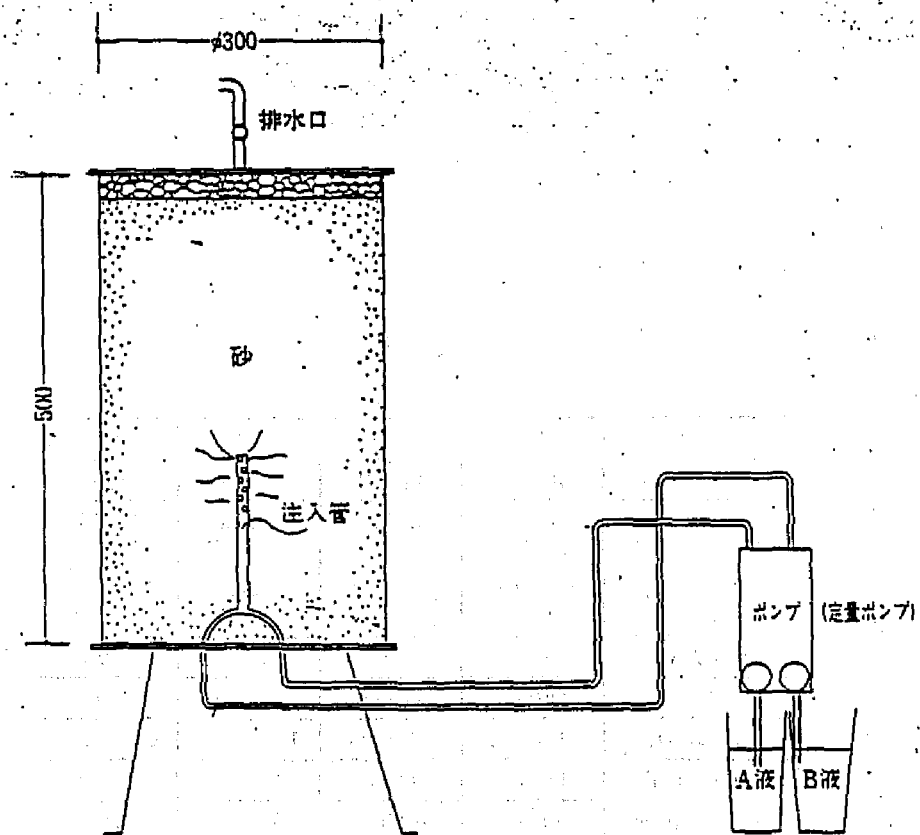


図-2.3 注入装置

ii) 注入装置

図-2.3に示すように、アクリル製の耐圧モールド(長さ:50cm, 径:30cm)、定量ポンプ、注入管(先端をストレナー加工)によって構成される。

iii) 注入条件

注入は注入速度を一定として行った。また、砂は一定の間隙率になるように木ヅチによって締め固め、あらかじめ水で飽和させている。注入の概要を表-2.2に示す。

iv) 固結状況

合計4個の固結体を作成した。図-2.4、表-2.2に示されるように、薬液が均一に

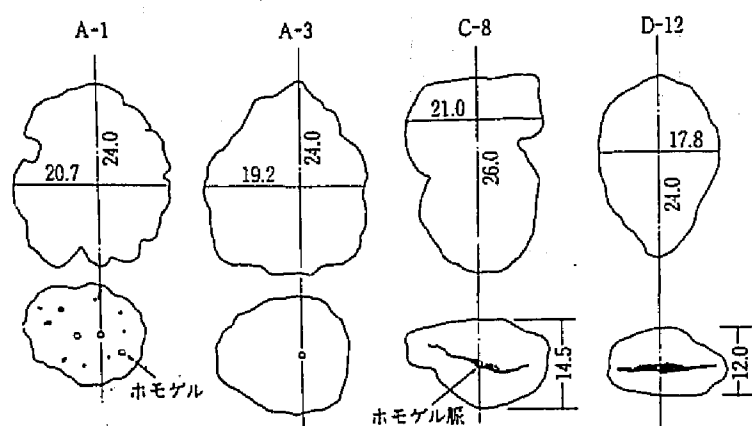


図-2.4 固結体のスケッチ
(上:側面, 下:1/2切断面)

表-2.2 注入結果の概要

NO.	A-1	A-3	C-8	D-12
対象砂	川砂	川砂	標準砂	川砂
間隙率	37.7%	37.1%	36.5%	37.6%
注入材	水ガラス 重炭酸ソーダ 塩化カリウム	左に同じ	左に同じ	水ガラス セメント
ゲルタイム	9.6秒	31.2秒	5.0秒	22.0秒
注入速度	2ℓ/min	2ℓ/min	2ℓ/min	2ℓ/min
注入圧	1.1kg/cm ²	1.2kg/cm ²	1.9kg/cm ²	6.0kg/cm ²
注入量(V ₁)	1.645 ℓ	1.745 ℓ	1.700 ℓ	0.555 ℓ
固結体積(V ₂)	6.450 ℓ	6.871 ℓ	6.209 ℓ	2.338 ℓ
固結倍率(V ₂ /V ₁)	3.91	3.95	3.70	4.22
実施注入率(V ₁ /V ₂)	25.5%	25.3%	27.0%	23.7%
固結状況	ホモゲル散在	均一浸透	脈状	脈状

浸透しているのは川砂にゲルタイムがやや長い薬液を注入したA-3のケースであり、ほぼ球形の固結体を得られる。ゲルタイムが短い薬液を注入すると、固結体の中にホモゲルの固まりや脈が見られる。また、懸濁型の注入材を注入した場合には固結体の体積が小さく、太いホモゲルの脈が形成される。

3.2 注入材の分布

2で述べた方法によって固結体およびその周辺の砂の注入材含有量を測定した。結果はてん充率によって表示し、図-2.5にその分布を示す。当然ながら、いずれ

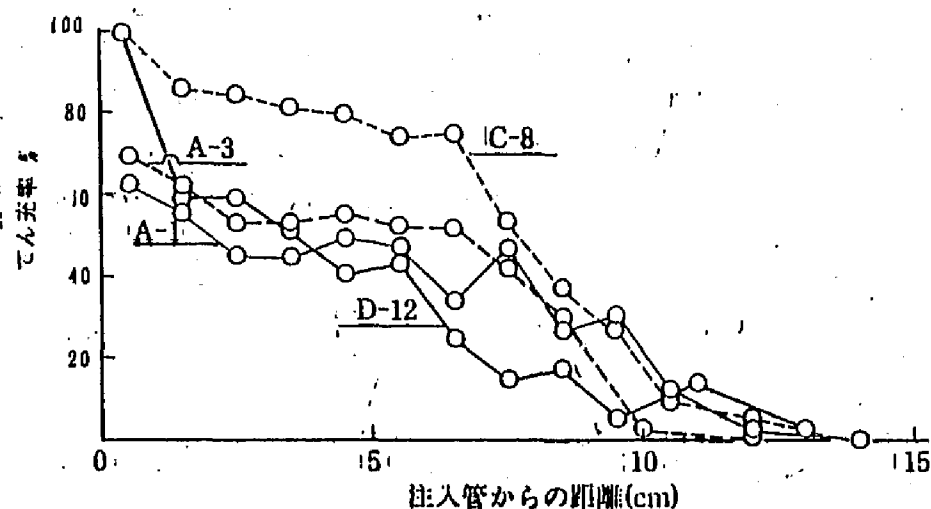


図-2.5 固結体のてん充率分布

の場合も注入管の近くで最大のてん充率を示す。そのてん充率は均一な浸透が生じたA-3で69.5%である。また、脈状注入の生じたC-8およびD-12では、この部分のてん充率は100%をこえる。一方、注入管から5cm前後離れた部分ではC-8を除き50-60%のてん充率を示すのに対し、C-8では80%前後の値を示す。さらに、固結部の外側の非固結部ではてん充率が溶液型で26%以下、懸濁型で15%以下となり、これらの値は砂の固結化に必要な薬液てん充率を示唆している。

なお、各試験体における測定結果の総括表を表-2.3に示す。ここにはてん充率

表-2.3 てん充率分布総括表

試験 NO	A-1	A-3	C-8	D-12
間隙率 $n\%$	37.7	37.1	36.5	37.6
固結部の間隙てん充率 $\alpha\%$	26.2-62.0	30.1-69.5	27.4-100	14.6-100
平均間隙てん充率 $\alpha\%$	43.5	52.3	71.5	50.8
標準偏差 $\sigma\%$	10.3	10.5	22.7	28.2
変動係数 $= \sigma/\alpha$	0.236	0.200	0.317	0.555

の標準偏差および変動係数を示しているが、変動係数は浸透注入のA-3で20%であるのに対し、脈状注入のC-8、D-12では31.8%、55.4%とおおきくなる。

以上の測定結果は、ここで提案している化学分析による注入材含有量あるいは薬液による間隙てん充率が砂の固結化の状況や注入による砂の強度あるいは止水性の向上の程度を推定するうえで有効であることを示唆している。

4 てん充率と注入効果の関係^{54,52}

4.1 供試体の作成

固結体は3.1と同様に作成した。注入の翌日この固結体から各種の試験体(径:5cm、長さ:10cm)を切り出した。用いた注入材は溶液型のもののみで、ゲルタイムが5-10秒の瞬結タイプのものと8-10分の緩結タイプのものとした。いずれの場合も、水ガラス濃度が25%の薬液を標準とし固結体の薬液によるてん充率を制御するために薬液を希釈して用いた。また、砂としてはけい砂(L6号)および川砂を用いた。

4.2 試験項目と方法

- i) 一軸圧縮試験 土質工学会法⁵⁵に準じてひずみ制御式で行った。
- ii) 三軸圧縮試験(UU) 側圧を0.5, 1.0, 2.0 kgf/cm²とし、ひずみ制御式で行い、粘着力および内部摩擦角を求めた。
- iii) 圧裂引っ張り試験 コンクリート分野で用いられているJIS A1113の圧裂法によって引っ張り強度を求めた。試験法の概略を図-2.6に示す。
- iv) 透水試験 側面をゴムスリーブでおおった試料を水中で加圧し、浸透水量を測定した。加えた圧力は1 kgf/cm²である。試験の概略を図-2.6に示す。

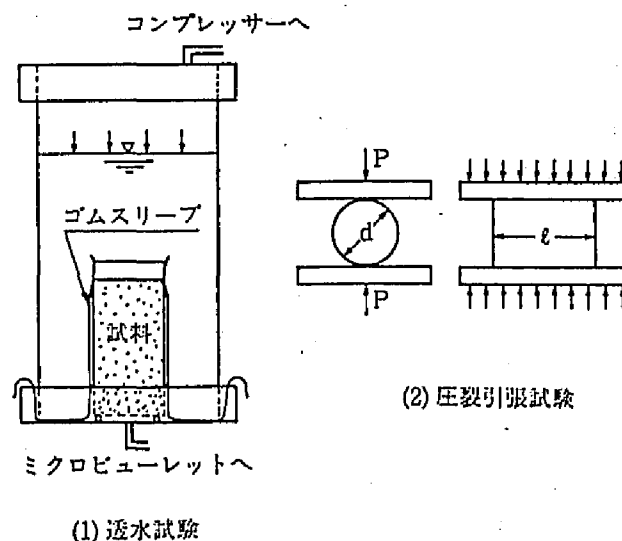


図-2.6 試験法の概略

v) 注入材含有量 2で述べた化学分析による方法によって測定し、てん充率によって表示した。

4.3 固結砂の物性

4.3.1 強度特性

i) 圧縮強度 固結砂(水ガラス:25%)の三軸圧縮試験の際の変形性状を図-2.7に示す。図中には各側圧における応力・ひずみ曲線を示し、側圧ゼロが一軸圧縮

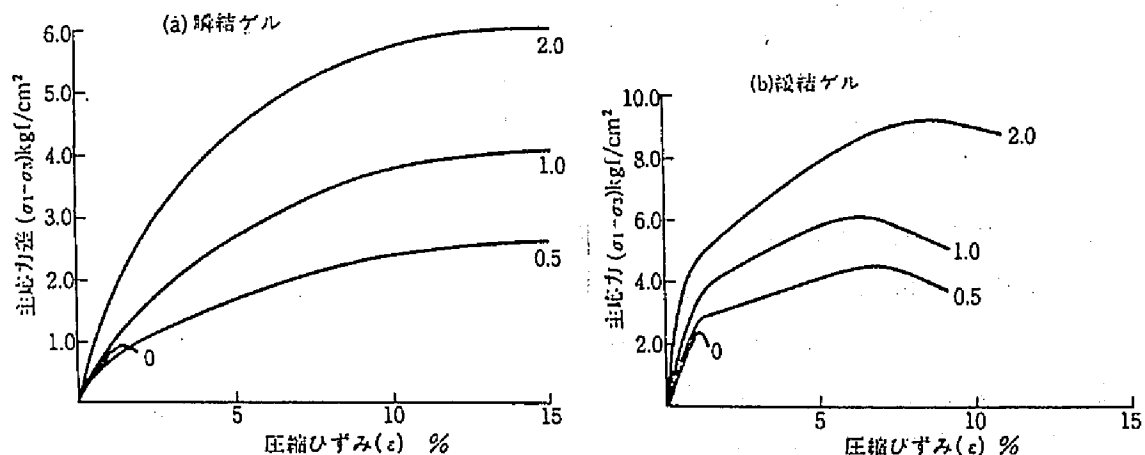


図-2.7 三軸圧縮試験における応力・ひずみ曲線

試験に相当する。一軸圧縮の場合には破壊ひずみが1%前後であるのに対し、三軸圧縮では破壊ひずみが著しくおおきくなる。注入材が瞬結タイプのものでは、ピークが見られず、緩結タイプのものでは、変曲点が二つ現れ二種類の応力・ひずみ曲線を合成したような形となる。緩結タイプではホモゲルの強度が高いため砂の破壊とは別にホモゲルの破壊が明瞭に現れ破壊が二段階で生じたものであろう。なお、緩結タイプの三軸圧縮における二つの変曲点は1%前後と7%前後で見られ、前者は一軸圧縮における破壊ひずみにほぼ一致する。強度関係の結果を表-2.4に示すが、粘着力、内部摩擦角ともに緩結タイプで大きくなる傾向にある。

ii) 引っ張り強度 圧裂引っ張り強度は0.25-0.46kgf/cm²範囲にあり、三軸圧縮試験による粘着力と近似した値を示す。この場合ももともとはゼロであったと思われるので、引っ張り強度はホモゲル自体の強度あるいは凝集力に由来すると考えられる。

4.3.2 止水性

川砂、けい砂の注入前の透水係数はそれぞれ 2.3×10^{-2} cm/sec、 1.6×10^{-2} cm/secであった。注入後の値は 10^{-4} - 10^{-8} cm/secの幅広い範囲に分布し、図-2.8に示すように、注入材の種類、砂の種類によって分布範囲が異なる。特に、注入材の差は顕著に影響し、瞬結ゲルでは緩結ゲルより高い透水係数を示す傾向にあ

表-2.4 強度試験結果一覧

		川 砂		珪 砂	
		瞬 結	緩 結	瞬 結	緩 結
一軸圧縮試験	圧縮強度 q_{uk} kgf/cm ²	1.60	1.80	1.75	4.23
	破壊ヒズミ ϵ %	1.2	1.1	1.4	0.8
	変形係数 E_{30} kgf/cm ²	118	310	295	547
三軸圧縮試験	粘着力 C kgf/cm ²	0.33	0.1~1.1	0.33~0.57	0.33~0.70
	内部摩擦角 ϕ	34'~41'50'	42'10'~49'50'	34'20'~41'50'	41'50'~52'30'
圧裂引張強度 σ_T kgf/cm ²		0.45	0.46	0.25	0.46
注入前の間隙率		32.1%		37.5%	

り、またバラツキが大きく同一の水ガラス濃度でも試料採取位置によって100倍近い差を生じる。このように大きなバラツキの原因は注入材が部分的に脈状に浸透したことに起因すると思われ、脈が顕著な試料では大きな透水係数となった。これに対し、緩結ゲルでは値が比較的そろっており均一な浸透が起きていることを示している。

4.4 注入による改良効果とてん充率の関係

4.4.1 強度との関係

てん充率は水ガラス濃度が25%の標準配合の場合には瞬結ゲルで80%前後、緩結ゲルで70%前後の値となった。水ガラス濃度が低くなるとややてん充率が高くなるが、土中の非結晶性シリカから、標準配合の注入材のてん充率として換算すると20%から80%まで幅広く分布するようになる。以後、てん充率としてはこの値すなわち標準配合の注入材に換算したてん充率を用いる。強度とてん充率の関係を考察するに際し、注入材の影響を除外するため固結砂の強度とホモゲルの強度の比(S/H)を求め、 S/H とてん充率の関係を図-2.9に示した。図示したように、 S/H はてん充率の増加につれて増大し、両者の関係は $y=ax(a>0, b>1)$ で示される。てん充率が0.4-0.5で S/H が1.0を越え、すなわち砂の強度がホモゲルの強度をうわまわるようになる。なお、強度の増加勾配はけい

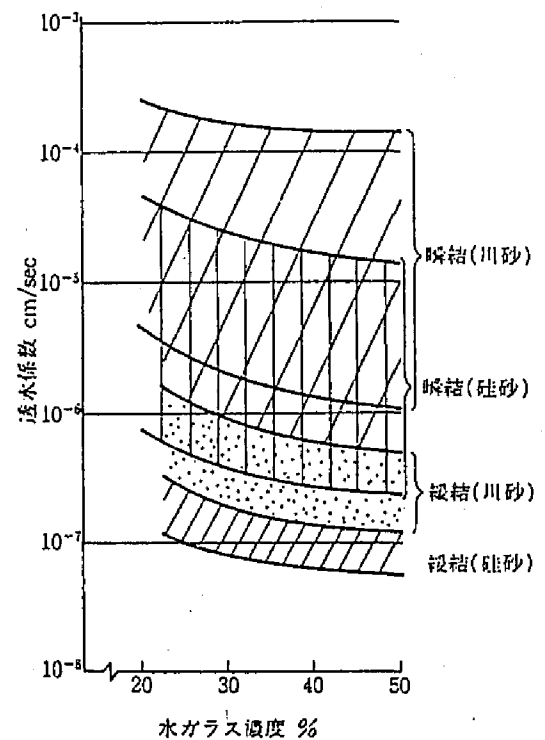


図-2.8 固結体の透水係数

後、てん充率としてはこの値すなわち標準配合の注入材に換算したてん充率を用いる。強度とてん充率の関係を考察するに際し、注入材の影響を除外するため固結砂の強度とホモゲルの強度の比(S/H)を求め、 S/H とてん充率の関係を図-2.9に示した。図示したように、 S/H はてん充率の増加につれて増大し、両者の関係は $y=ax(a>0, b>1)$ で示される。てん充率が0.4-0.5で S/H が1.0を越え、すなわち砂の強度がホモゲルの強度をうわまわるようになる。なお、強度の増加勾配はけい

砂のほうが大きく、瞬結ゲルと緩結ゲルの差は明瞭ではない。

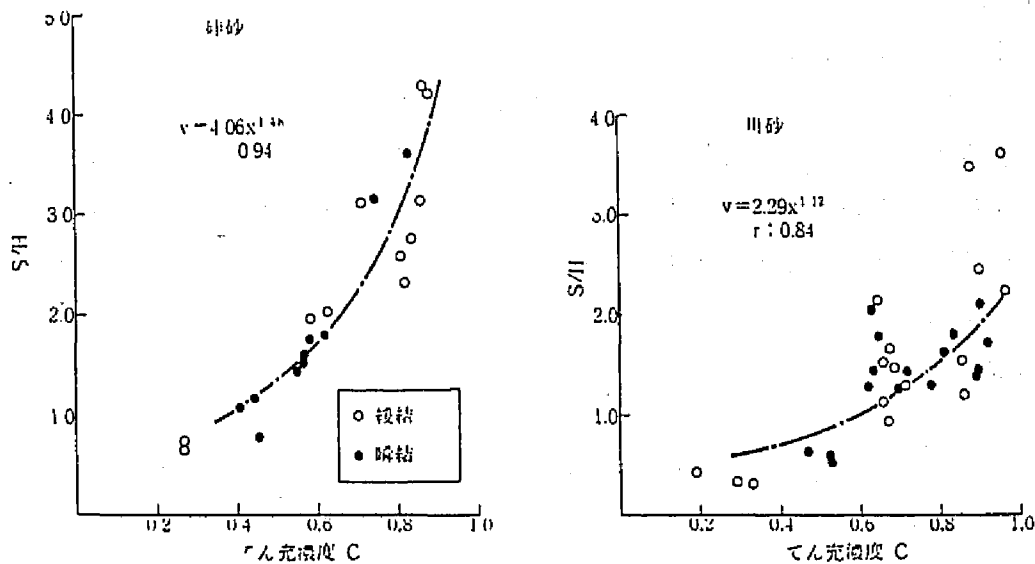


図-2.9 強度比(S/H)とてん充率の関係

4.4.2 透水係数との関係

固結砂の透水係数とてん充率の関係を図-2.10に示す。瞬結ゲルでは浸透注入と脈状注入が生じるが、浸透注入ではてん充率の増大につれて透水係数が低下するが、脈状注入ではてん充率が100%でも透水係数は 10^{-4} cm/secをうわまわることがあり、十分な止水性が得られない。一方、緩結ゲルではいずれも浸透注入であり、てん充率の増大とともに透水係数が低下する。止水性の目安とされる透水係数が 10^{-5} cm/sec以下となるのに必要なてん充率は瞬結ゲルの浸透注入の場合で50%前後、緩結ゲルの場合ではデータが少ないがほぼ40%前後と思われる。脈状注入の場合には透水係数はてん充率と関係なく比較的大きな値を示す。これらの結果から止水性の確保が必要な場合の注入は緩結ゲルの注入が望ましく、その際のてん充率は40%以上が必要

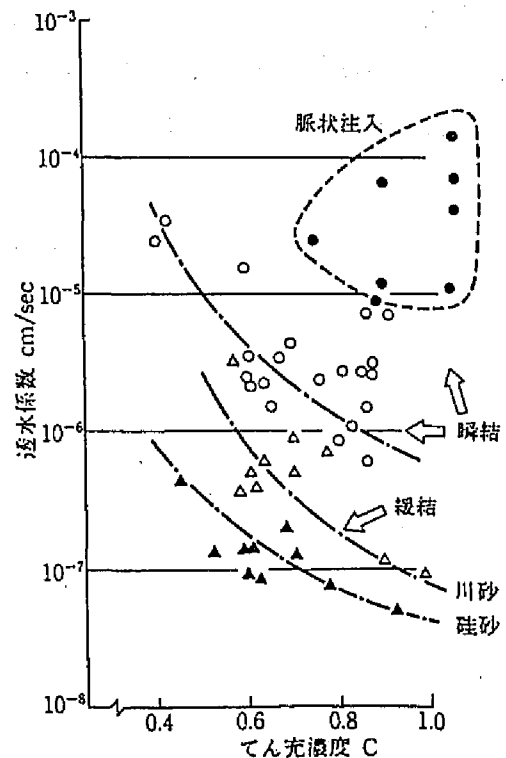


図-2.10 透水係数とてん充率の関係

であるといえよう。

4.4.3 てん充率の範囲の意味

なお、一連の実験において注入材による間隙てん充率は浸透注入の場合でも最大値で70%となり、間隙の全部を薬液によって置換するわけではないことが判明した。これは、薬液注入における浸透現象が土中の間隙水を排除しつつ進行する際に、排除されやすい水と排除されにくい水が存在することを示唆している。同様な現象は地下水を揚水する場合にも見られ、揚水しうる水は間隙率に係数を乗じたものとし、この係数を貯留係数とよんでいる。この値は土の粒度などによって異なるが、砂質土で0.6-0.8としている⁵⁹。今回の実験によるてん充率はこの貯留係数に近似している。

5 おわりに

注入による地盤改良効果を確認する簡便な方法を開発するのに先立ち、地盤中の注入材の分布を把握することが重要と考え、まず化学的手法を用いて非結晶性シリカを定量することにより注入材含有量を測定する方法を検討し、この方法により注入土の測定が可能であり、精度もほぼ満足しうることを確認した。さらに、室内で作成した注入固結体についてこの方法によるてん充率と地盤改良効果の関係を検討した。その結果、十分な地盤改良効果を得るのに必要なてん充率は注入材によっても異なるが、ほぼ50%前後であることが判明した。今後は実際の注入現場における注入材の分布を調査するとともに、その結果と地盤改良効果との関係を明らかにする必要がある。

第三章 注入地盤における注入材の分布と地盤改良効果^{5,7,58}(1)

--砂地盤の場合--

1 はじめに

第二章では注入地盤における注入材の分布を土の化学分析によって調査する方法の適用性を室内注入実験によって検討した。従来、注入地盤の注入材の分布や浸透状態を定量的に把握する方法はなく⁴⁷、唯一用いられているフェノールフタレインの発色を見る方法にしても注入材の有無を定性的に判定するのみである。したがって、第二章で述べた方法が実際の注入地盤について適用できるなら、その適用結果は適切な注入工法の設計、施工を行うのに有効に利用することも可能であろう。特に、この方法では地盤改良効果を支配する透入率を測定できるので、データの蓄積によりの確かな注入設計が可能になる。そこで、注入を行った砂地盤の現場にこの方法を適用し、注入材の分布を調査するとともに地盤改良効果との関係について検討した。

2 調査現場

2.1 現場概要

調査を行ったのはいずれもシールド工法によって地下に横穴状の構造物を構築するもので、構造物は下水道の管路(現場B、D)、地下鉄の駅舎部(現場C)、共同溝(現場A)などである。シールドの掘削径は2.8m-10mまで幅広く分布する。また、土被りは現場A、Cでは30m前後、現場B、Dでは5m前後である。現場A、Cでは水圧の高い洪積層の止水が、一方、現場A、Cではルーズな沖積層の強度増加が課題となる。

2.2 土質

各現場の土質柱状図を図-3.1に示す。シールド掘削の対象となる土層は現場A、Cでは標準貫入試験のN値が20未満のゆるい沖積砂層である。現場B、DではN値が50以上であるが透水係数は 10^{-3} cm/secのオーダーの洪積砂層を掘削対象とする。各砂層の砂の粒径分布を図-3.2に示す。

2.3 注入工事

注入工事の概要を表-3.1に示す。ここに表示したように、薬液注入工法を採用した目的と用途は、掘削切羽の安定が十分に確保されない区間の崩壊防止であり、地盤の強度および止水性の向上を期待している。注入工法の種類はゲルタイムの長い注入材を用いる二重管ダブルパッカ-工法とゲルタイムが極度に短い二重管瞬結工法を採用した。注入材はいずれも水ガラス系のものである。また、設計注入率とは第一章の(1)式によって示されるもので、注入対象の土の体積に

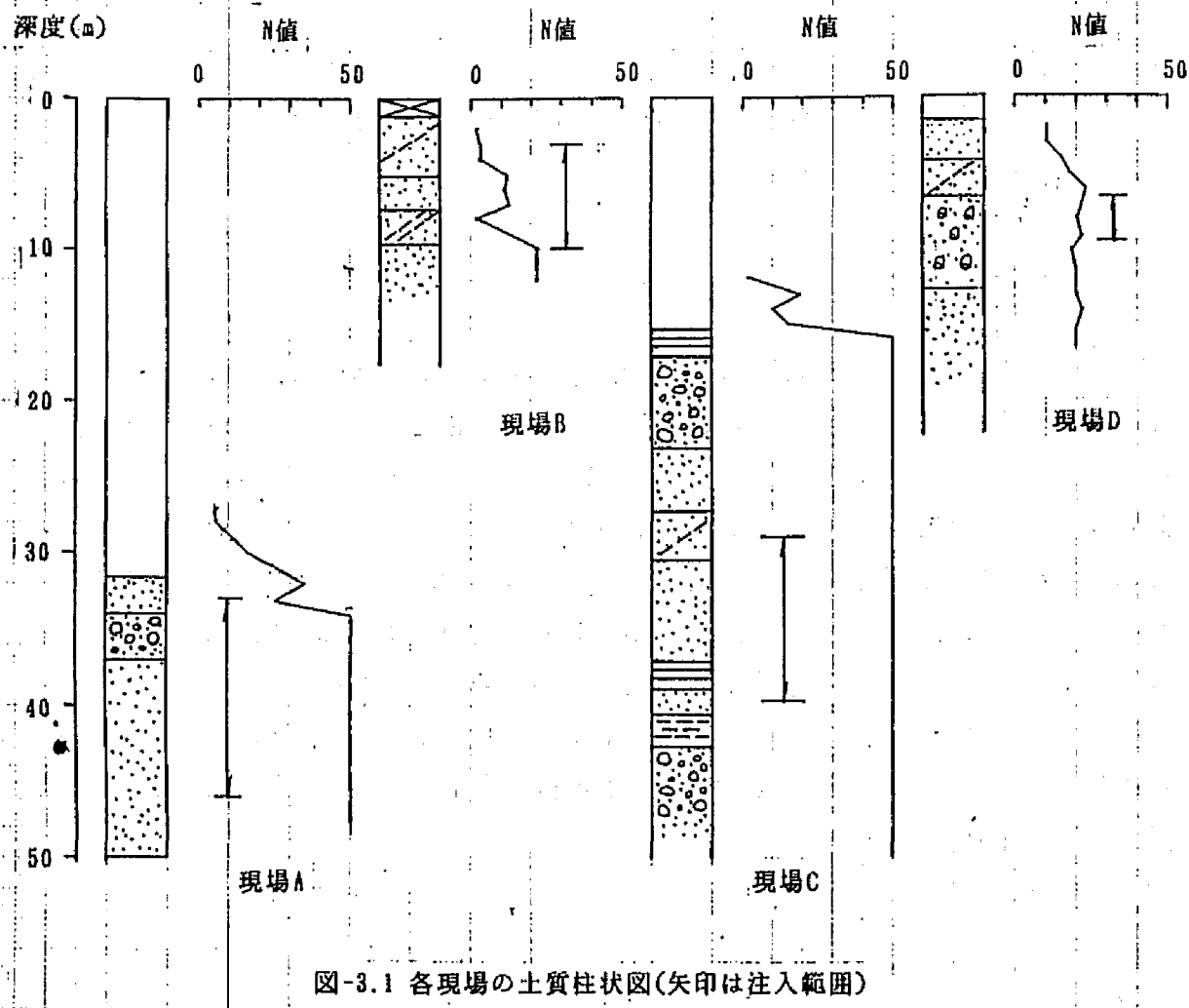


図-3.1 各現場の土質柱状図(矢印は注入範囲)

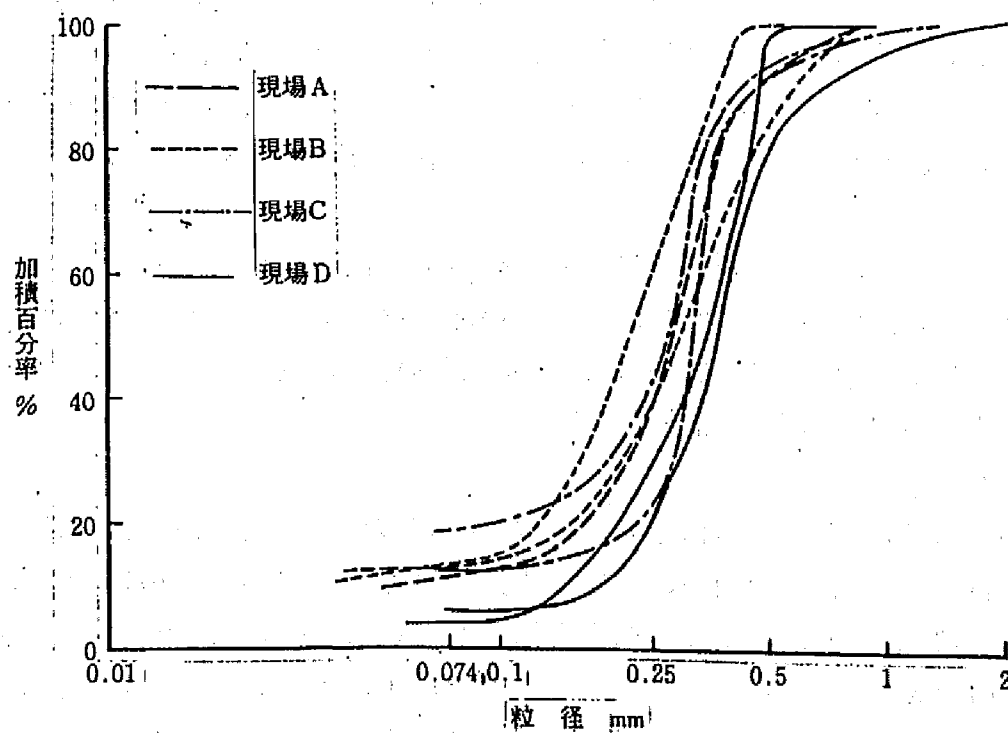
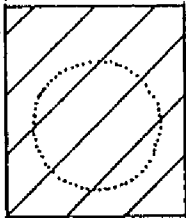
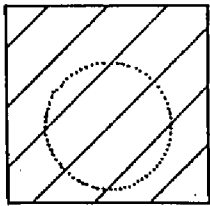
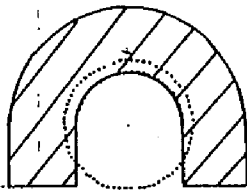
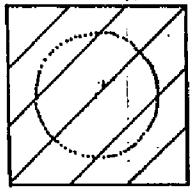


図-3.2 注入対象土の粒径分布

表-3.1 調査現場の注人工事の概要

現場	A	B	C	D
工事種別	共同溝	下水道	地下鉄	下水道
対象土質	洪積砂層	沖積砂層	洪積砂層	沖積砂層
注入目的	シールド初期発進防護	道路横断防護	河川横断防護	急曲線部防護
注人工法	シリカライザ-工法	二重管瞬結工法 ダブルバッカ-工法	二重管瞬結工法	二重管瞬結工法
注入材 (ゲルクイム)	シリカゾル系 (40-50分)	溶液型無機系 (2-5秒) 溶液型有機系 (50分)	溶液型無機系 (5-15秒)	シリカゾル系 (5-15秒)
設計注入率	40%	38%	20%	35.9%
注入断面				
注入深度	33.0-46.0m	3.0-10.0m	27.0-39.8m	6.6-9.6m

対する注入量の割合であるが、20%-40%の範囲にある。注入は現場A、Cでは路上から行い、現場B、Dでは坑内からの水平注入、斜め注入によった。

3. 調査方法

3.1 注入材の分布

A現場ではシールドの発進立坑の中から鏡切りの直後に水平方向に採土管(長さ5cm、径:5cm)をたたきこみブロック状の試料を採取した。また、他の現場ではシールド掘削の際に切羽からブロックサンプルを採取した。これらの試料は湿潤状態で保存し化学分析に供した。

これらの試料について非結晶性シリカの含有量、PH、電気伝導度を測定した。測定方法は非結晶性シリカについては前章で述べた方法、PH、電気伝導度は土質工学会法によった。非結晶性シリカの値からはてん充率を算出した。

3.2 地盤改良効果

いずれの現場の場合もブロック試料を採取し、一軸圧縮試験を行った。試料の大きさは径5cm、長さ10cmを標準とし、土質試験法(土質工学会編)に定めるひずみ制御式の試験によった。

また、止水性については、ブロックの透水試験および現場透水試験を行った。

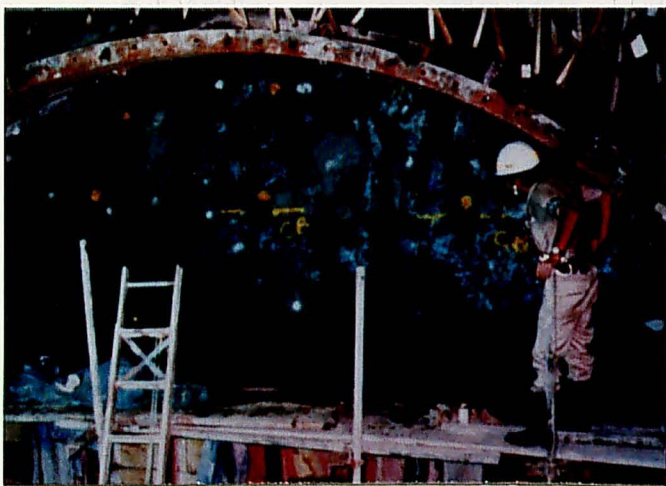
なお、現場B、Dでは試験注入を行い、標準貫入試験も行っている。

4. 調査結果

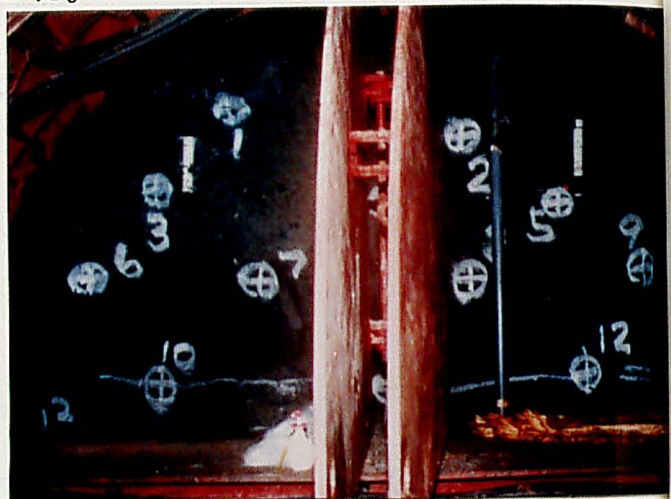
4.1 注入地盤の状態

i) 現場 A

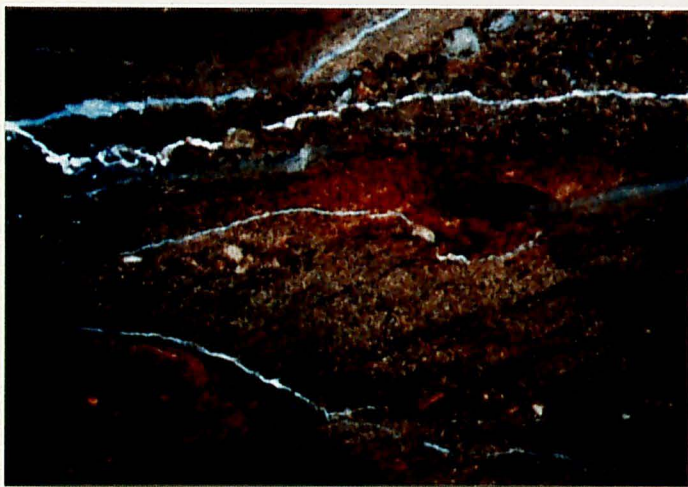
鏡切りの際に現れた切羽は自立し、場所によっては水がにじみだしていたが、湧水はなかった。薬液はほぼ均一に浸透していた。



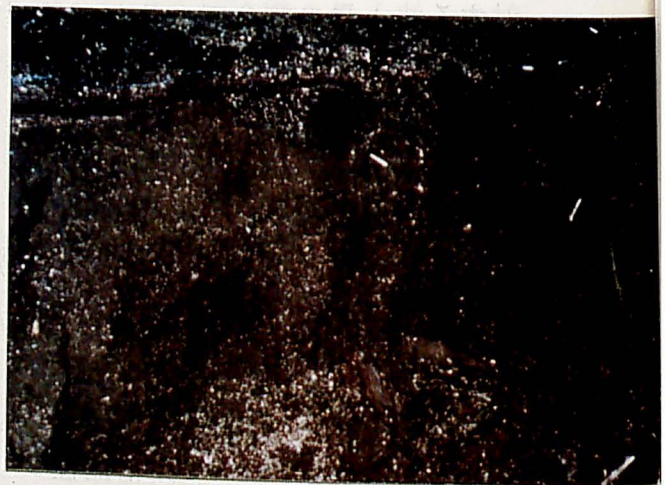
現場 A



現場 B



現場 C



現場 D

写真 切羽の状態

ii) 現場 B

この現場では注入場所によって注入工法を変え、二重管瞬結工法と二重管ダブルパッカ-工法を採用している。二重管瞬結工法の区間の切羽には薬液の固結したホモゲルの脈が縦横に走り、脈状注入が生じている。一方、二重管ダブルパッカ-工法の区間では切羽の砂層にまんべんなく薬液が浸透し湧水は全く認められなかった。

iii) 現場 C

ここでは三種の二重管瞬結工法を採用しているが、いずれの区間でもホモゲルの脈が走り、脈は連続した長いものが多かった。圧気が十分に効いて切羽は脱水状態を呈していた。

iv) 現場 D

ここでもホモゲルの脈が見られるが、脈は細く連続性に乏しい。脈の密度は高く、切羽の全体が細脈で強化されているようであり、浸透注入と脈状注入の両方が生じている。以上の各現場の切羽の写真をまとめて示す。

4.2 注入材の分布

i) 現場 A

化学分析結果の例を表-3.2に示す。PHは8.5-10.3の範囲に分布する。使用した注入材は中性系のシリカゾルであるが注入土のPHは必ずしも中性とはなっていない。電気伝導度は1000-2000 μ S/cmで注入前の300 μ S/cm前後に比べてかなり高くなる。てん充率は6.7-100%の範囲にあり平均値は57.4%と他の現場に比べて高い。また、標準偏差は24.9%、変動係数は0.433である。

ii) 現場 B

化学分析結果の例を表-3.2に示す。PHは8.6-10.2の範囲に分布し、電気伝導度は二重管瞬結工法で225-2000 μ S/cm、ダブルパッカ-工法で1100-1700 μ S/cmとなる。てん充率は瞬結工法で5.4-100%、ダブルパッカ-工法で4.5-88.2%に分布し、平均値はそれぞれ32.1%、40.8%である。てん充率のばらつき(標準偏差)は前者で28.5%、後者で18.2%であり、ダブルパッカ-工法の方が均一な浸透がなされている。

iii) 現場 C

化学分析結果の例を表-3.2に示す。ここでは区間を分けて三種類の二重管瞬結工法を採用しており、注入材もそれぞれ異なっている。A工区では塩化カリウムを硬化剤としているが、PHはアルカリ側を示し、てん充率は16-69%を示す。B工区では中性系のシリカゾルを用いているが、PHが3.0-4.5の酸性を示す土が多く、計画のような中性領域にはない。てん充率は3.7-83.5%と幅広く分布する。C工区ではアルミン酸ソーダを硬化剤としているが、PHはアルカリ側の値を示し、てん

充率は24.3-78.4%の範囲にある。なお、この現場では非注入部の土のPHが4.0前後と極めて低い。これは、嫌気的狀態にあった砂層が圧気シールドの高圧空気の吹き込みによって急速に酸化され、土に含まれた硫黄化合物が硫酸に変化したことによるとと思われる。このような事例は他の現場でも報告されている⁵⁹。

iv) 現場 D

化学分析結果の例を表-3.2に示す。ここでも二重管瞬結工法を採用し、注入材は中性系のシリカゾルを用いている。PHは6.9-9.9の範囲にあり弱アルカリ性を示す。電気伝導度は $1000\mu\text{S}/\text{cm}$ 前後、てん充率は2-56%の範囲であり、平均値は37%、標準偏差は18.5%、変動係数は0.5である。

4.3 地盤改良効果

現場Aでは切羽に径19mmのインナ-ロッドで掘削した穴からの湧水を測定したが湧水量は $5\text{l}/\text{min}$ 以下であった。また、いくつかのブロックの一軸圧縮強度は $2.2\text{--}4.2\text{Kgf}/\text{cm}^2$ の範囲にあった。このため、切羽は完全に自立し、シャベルでは掘削ができずブレイカ-でようやく掘削が可能な状態であった。

現場Bでは試験注入によって効果を確認している。図-3.3に注入前後のN値の変

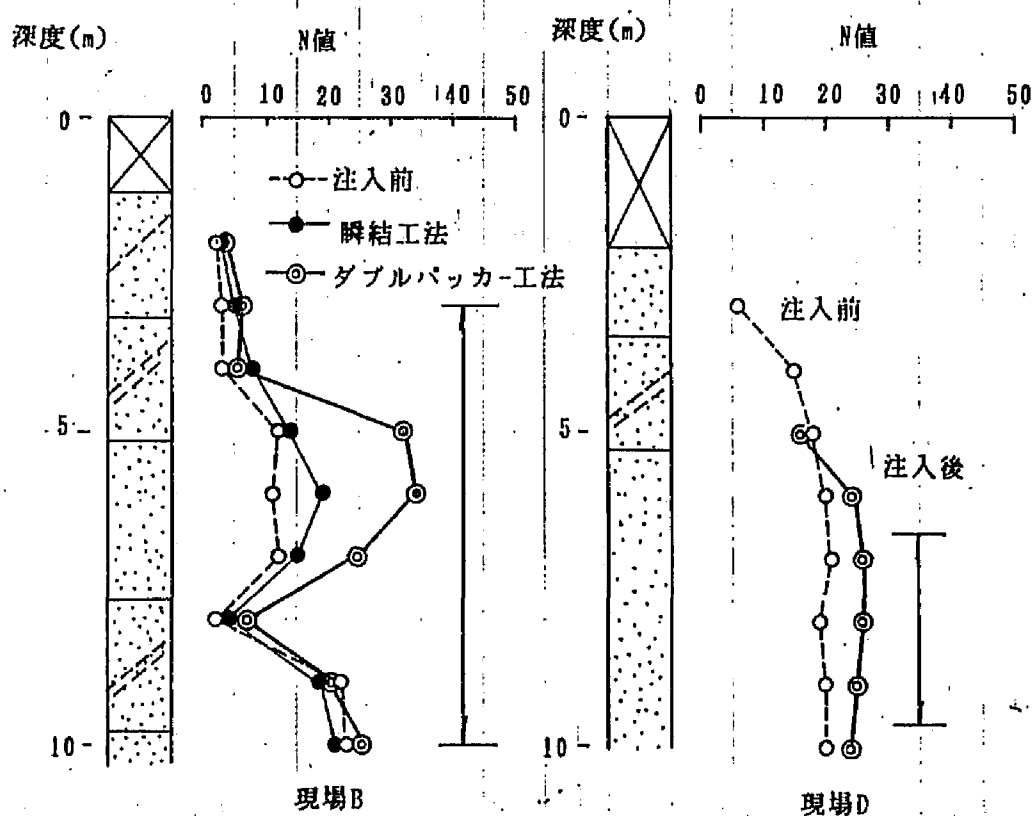


図-3.3 試験注入における注入前後のN値の変化

表-3.2 化学分析結果の例

現場	注入工法		てん充率 %	pH	電気伝導度 $\mu\text{S/cm}$
A	ダブルパッカ工法		38.4	8.7	900
			84.0	9.7	1450
			17.8	9.7	1650
			42.3	9.5	900
			75.3	9.7	1560
B	ダブルパッカ工法		37.1	10.0	1700
			22.6	9.3	1100
			73.6	10.2	1400
			56.0	9.9	1700
			6.5	8.6	1200
	瞬結工法		42.3	9.2	1025
			26.5	9.3	225
			8.9	8.6	271
			12.8	8.9	900
			48.6	9.3	2030
C	瞬結工法	A区	73.7	9.5	1300
			57.0	8.5	850
			39.4	10.5	1200
		B区	3.7	3.0	890
			83.5	4.2	460
			53.2	3.4	1350
		C区	36.2	9.9	900
			16.2	9.2	440
			68.9	10.1	1750
D	瞬結工法		47.7	9.8	1230
			10.5	8.0	920
			56.7	9.9	1260
			52.5	9.7	1210
			21.5	6.9	1020

化を示すように、二重管瞬結工法で2-8の増大が、二重管ダブルパッカ-工法で10-20の増大が見られ、後者における効果が著しい。また、現場透水試験の結果でも注入前に 2.1×10^{-3} cm/secのものが、瞬結工法で 2.0×10^{-4} cm/sec、ダブルパッカ-工法で 9.6×10^{-5} cm/secに低下し、両工法ともにほぼ満足しうる止水効果を示す。一方、掘削切羽から採取したブロックの圧縮強度は0.5-2.2Kgf/cm²のものが多かった。

現場Cでは掘削切羽の採取土の圧縮試験のみを行ったが、いずれの工法の区間でも0.7-1.8Kgf/cm²の範囲にあり、特に区間による差は認められなかった。

現場Dでは試験注入を行っている。その際に得られた透水係数は注入前で 5×10^{-3} cm/secのものが注入後に 6.7×10^{-4} cm/secとなった。また、N値は当初15前後のものが25前後に増大した。さらに、掘削中に切羽から採取した試料の圧縮強度は0.5-1.5Kgf/cm²の値を示すものが大半であった。

なお、いくつかの試料の一軸圧縮試験の際の応力・ひずみ曲線を図-3.4に示す。

5. 考察

5.1 掘削切羽におけるてん充率の分布

各現場のてん充率の分布をヒストグラムで図-3.5に示す。また、てん充率分布の総括表を表-3.3に示す。各現場それぞれに特徴のある分布を示すが、特に注入工法による違いが明瞭に現れている。すなわち、現場Cおよび二重管瞬結工法の現場Bでは、てん充率が20-40%に最大値を示すのに対し、二重管ダブルパッカ-工法の現場Bおよび現場Aではてん充率が高い方にずれ、1/3以上がてん充率が60%以上に分布する。また、現場Dはこれらの中間に位置している。これらの測定結果は切羽の観察結果とも一致し、ホモゲルの脈の少ない浸透注入ではてん充率が高く、太い脈の多い脈状注入ではてん充率が低く、細い脈の多い場合にはこれらの中間になる。また、てん充率のばらつきを変動係数で示した場合、二重管ダブルパッカ-工法では0.44前後、二重管瞬結工法では0.5-0.887の範囲となり、前者でやや均一性

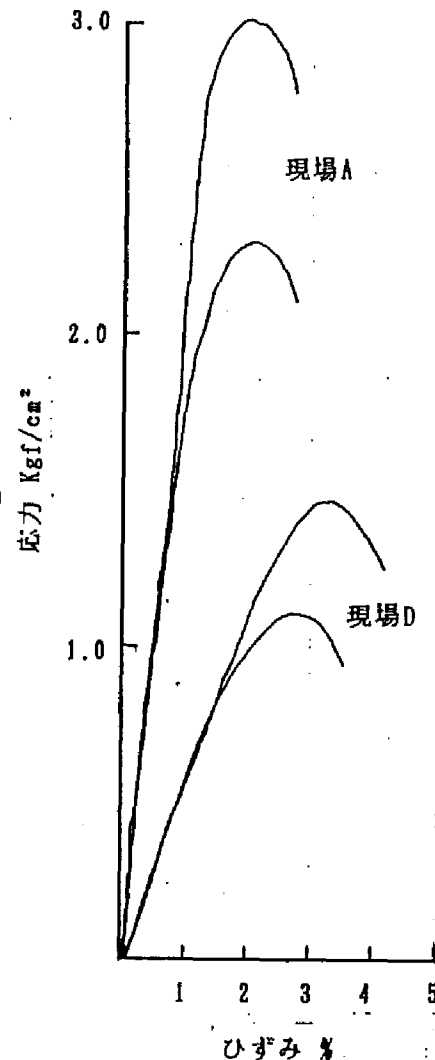


図-3.4 注入土の応力・ひずみ曲線

の高い注入が行われていることを示している。

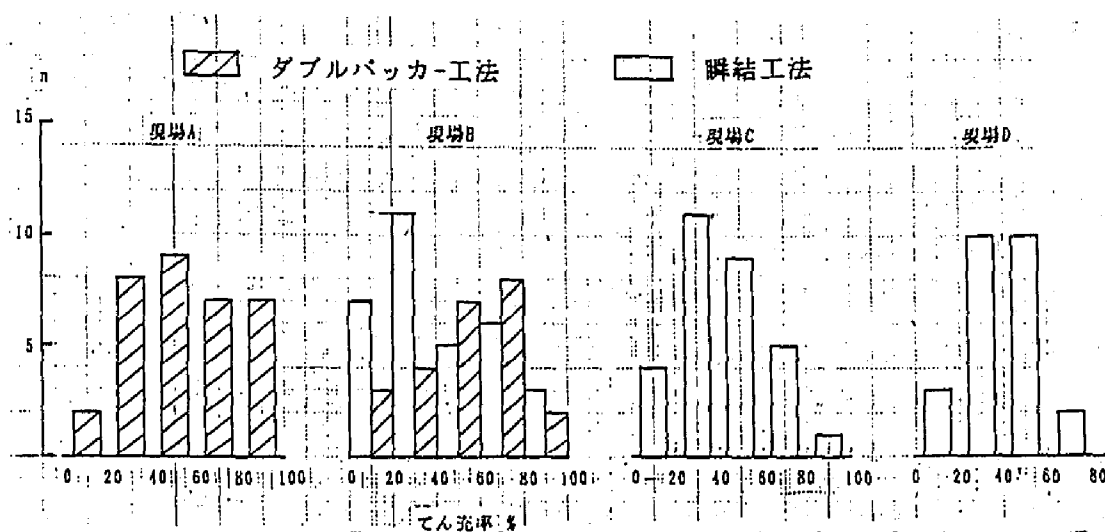


図-3.5 各現場のてん充率分布

表-3.3 各現場のてん充率分布総括表

現場	工法	試料数	範囲	平均値%	標準偏差%	変動係数
A	ダブルパッカー-工法	33	6.7-100	57.4	24.9	0.433
B	ダブルパッカー-工法	24	4.5-88.2	40.8	18.2	0.446
	瞬結工法	32	5.4-100	32.1	28.3	0.887
C	瞬結工法	30	3.7-83.5	41.5	26.6	0.640
D	瞬結工法	25	2.0-66.0	37.0	18.5	0.500

ところで、注入工法の設計を行う場合、第一章で述べたように土の間隙のてん充率を設定する。この設計上のてん充率は、表-1.1⁴³に示したように砂質土では80-90%の値を採用することが多い。しかし、ここで得られたように、土質および注入工法の種類によって異なるものの、てん充率の平均値はこれほど高くはなく、せいぜい50%前後である。このように低い値となるのは、薬液が注入予定範囲に限定されず、限定注入が可能といわれる二重管工法でさえ、かなりの部分が予定範囲の外へ逸失していることを示している。これは、注入薬液による間隙水の排除が不十分なためと思われる。現在の注入速度(10-15l/min)より低い速度で注入することが必要であることを示唆している。いずれにせよ、注入による地盤改良程度を予測する場合、てん充率が50%程度の土の強度あるいは止水性しか期待できないと考えたほうがよいと思われる。なお、第二章で述べたように、注入による効果はてん充率が40-50%を越えた所で顕著になるので、現場におけるてん

充率は必ずしも高くはないにもかかわらず、かなりの効果が現れているものと思われる。

ところで、注入材が従来考えられている程には間隙を充填しない理由は次のように推察される。すなわち、地盤の間隙は一般に地下水によって飽和されているが、この地下水は容易に流動する部分とそうでない部分とで構成されることが判明している。地下水を揚水する立場からは間隙率のうち前者の水で満たされた間隙を有効間隙率と呼んでいる⁹⁾。この有効間隙率は沖積砂層では15-20%、洪積砂層で30%といわれる。これらの数値の全間隙率に対する割合は、それぞれ50%前後、80%前後である。注入材の浸透も基本的には地下水の流動と同様と考えられるので、間隙のてん充率が必ずしも大きくならないのであろう。

5.2 地盤改良効果とてん充率の関係

切羽のブロックについて行った強度試験の結果とてん充率を図-3.6にプロットした。図中、現場Bのデータは二重管ダブルパッカ-工法についてのものである。この図によれば、各現場とも強度とてん充率はばらつきはあるものの、直線関係で示すことができる。洪積層の現場

A、Cではてん充率が20%未満の砂の強度がないが、てん充率がゼロの場合にも0.5-1.0Kgf/cm²の強度があるように思われる。また、沖積層の現場B、Dではてん充率が30%未満では全く強度を示さない。このように同じてん充率でも注入される砂の種類によって強度が異なる。

一方、それぞれの直線の勾配も二つのグループに別れる。すなわち、現場A、Bは現場C、Dに比べて勾配が大きい。これは注入材(ホモゲル)自身の強度の差に由来すると考えられる。すなわち、前者ではホモゲル強度の大きな硬化剤を用いており、第二章で述べたように、同じてん充率であればホモゲル強度の大きな注入材によるもの強度が大きくなる。

これらの結果は注入地盤の強度は注入前の砂の種類(締まり具合ある

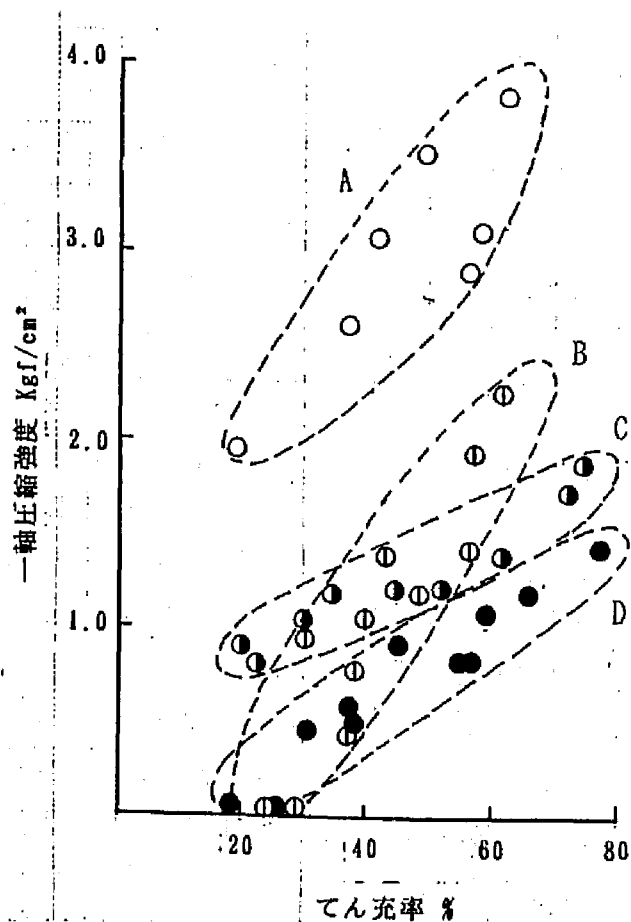


図-3.6 強度とてん充率の関係

いは強度)とホモゲルの強度およびてん充率によって決まることを示している。なお、強度増大に必要なてん充率は洪積層で20%以上、沖積層で30%以上であり、第二章の室内実験の結果の40%前後以上に比べてかなり低くても効果を発揮する。

なお、現場Bの瞬結工法の区間および現場C、Dの一部区間の切羽で強度不良あるいは漏水が発生した。その際に土を採取しててん充率を測定したが、いずれも10%以下の値を示した。

5.3 注入管からのてん充率の分布

一般に、薬液の地中での挙動は次の3タイプに分類される⁶⁾。

- ① 浸透注入(penetration)
- ② 割裂注入(fracturing)
- ③ 境界注入(roofing)

これらのうち、砂地盤で発生するのは①②であり、①では注入材が注入管から同心円状あるいは球状に分布するといわれ、このような浸透が上下方向あるいは水平方向に連続して地盤を均一に改良すると仮定している。そこで、この仮定が

実際の注入地盤でも成り立っているかどうかをてん充率の分布状態によって検討した。図-3.7に瞬結工法およびダブルパッカ-工法におけるてん充率の注入管からの分布を示した。ダブルパッカ-工法では注入管のごく近くで最大のてん充率を示すが、注入管から50cm離れても30%前後の値を維持しており、従来言われる浸透形式に近いといえる。ところが、瞬結工法の場合にはてん充率は注入管からの距離とは無関係に分布している。そこで、この場合にはホモゲルの脈を中心にしたてん充率の分布を見たところ、脈から10cm程度の範囲に薬液が浸透して

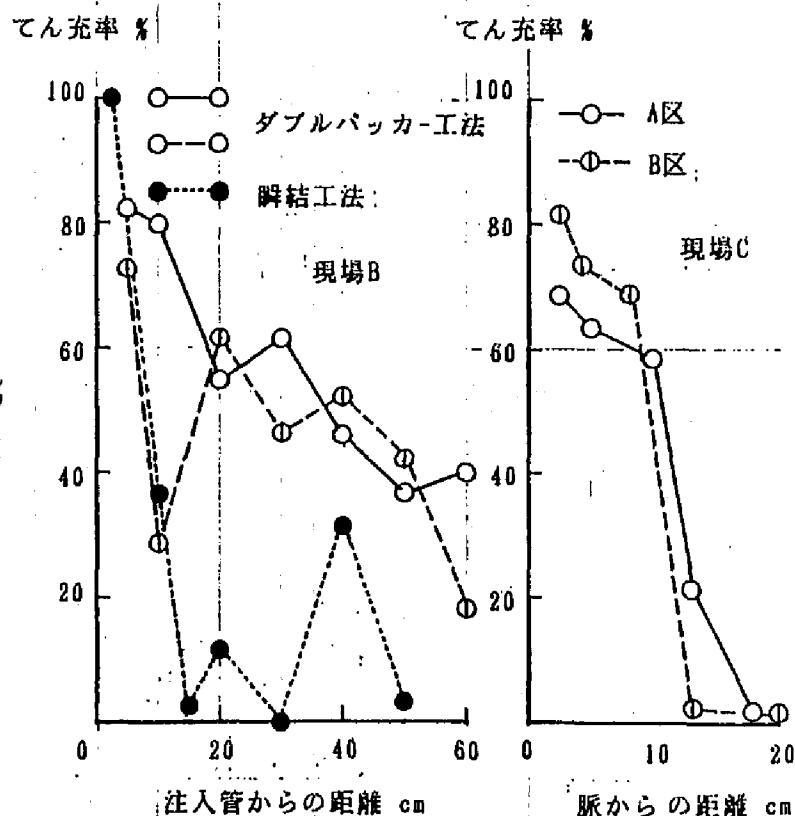


図-3.7 注入管、脈の付近のてん充率の分布

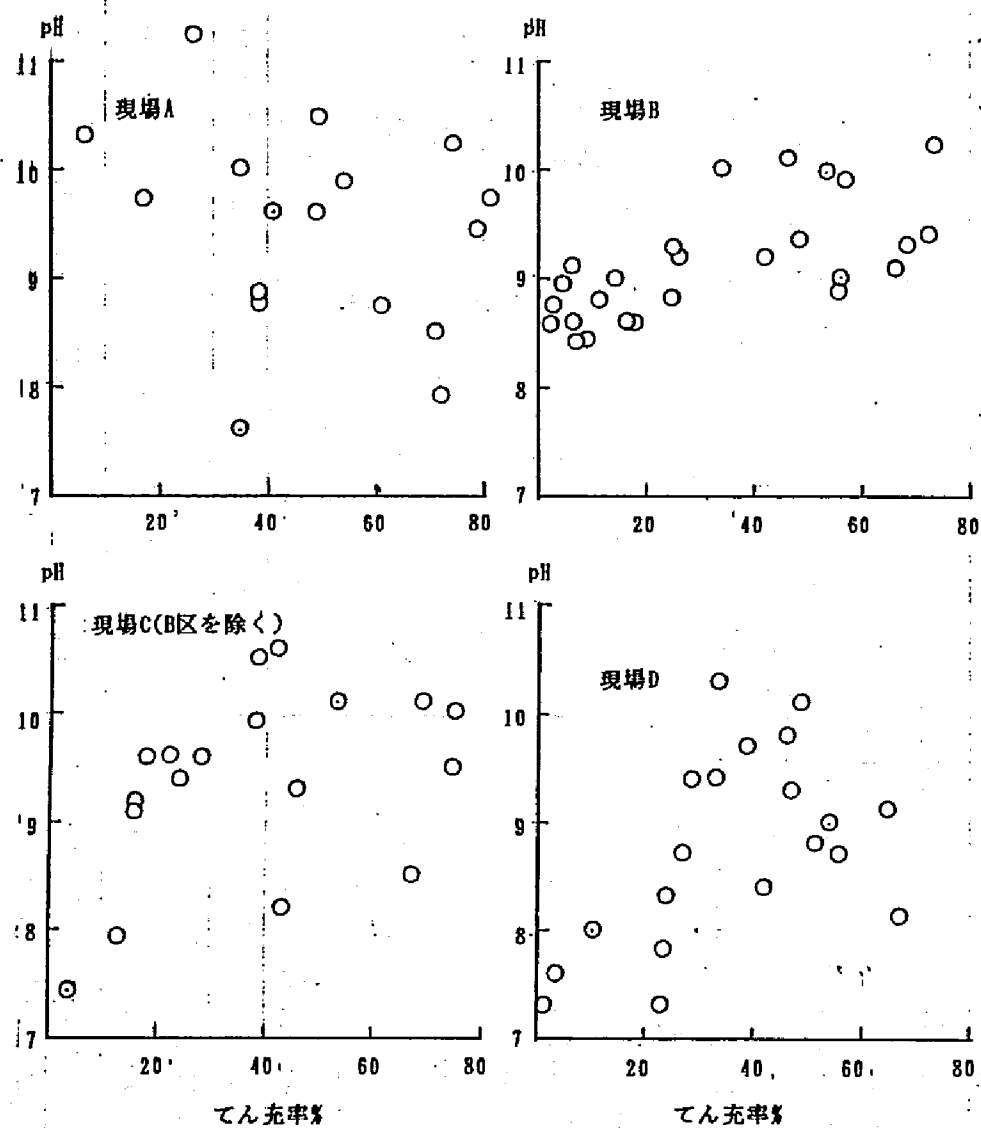


図-3.8 注入土のpHと水充率

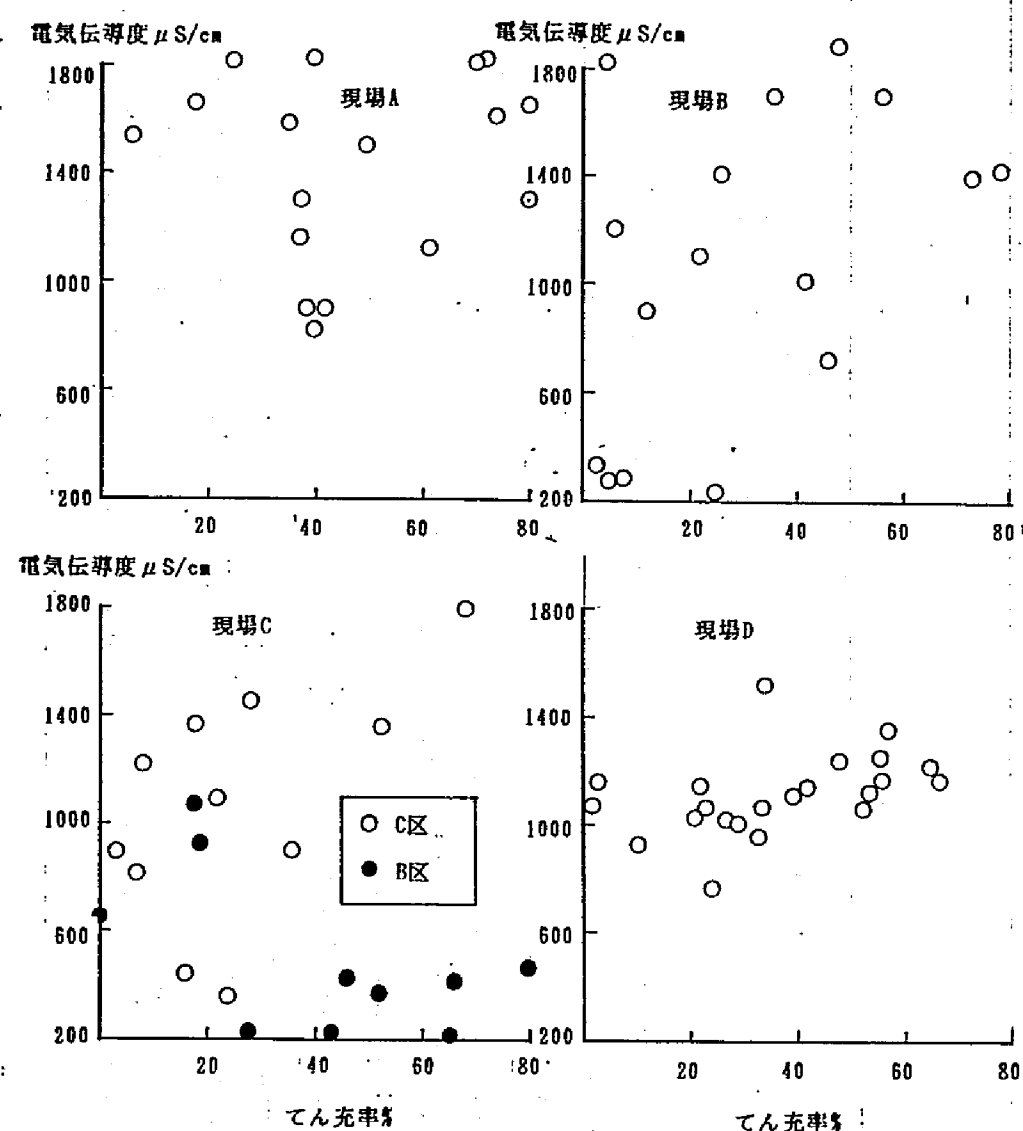


図-3.9 注入土の電気伝導度と水充率

いる。すなわち、瞬結工法の場合には注入管を中心に脈が発生し、この脈から薬液が浸透していることになり典型的な割裂注入であるといえる。したがって、この工法によって地盤を均一に改良するためには脈を四方八方に密度高く発生させることが必要であるといえよう。

5.4 PH、電気伝導度とてん充率の関係

ここで述べてきたように、注入地盤の薬液による間隙のてん充率を測定することは注入による地盤改良効果を推定あるいは管理するうえで有効である。しかし、この方法は化学分析を伴うため現場で簡便に採用しうる方法とはいいがたい。そこで、てん充率の測定にかわる簡便な方法によりてん充率を推定できれば施工管理のうえでおおいにプラスになると考え、比較的簡便なPHおよび電気伝導度による方法の可能性を検討した。

図-3.8にPHとてん充率の関係を示す。これによれば、シリカゾルを用いた現場A、DではPHとてん充率には一定の関係は見られない。現場Bでは一応の相関性が見られるが、ばらつきが大きくPHから推定されるてん充率には20-30%の誤差を伴い、実用に耐えうる精度とはいいがたい。現場Cでも、一応の相関性を示すのは注入材Aの場合のみであり、ここでも、PHから判定しうるのは注入材の有無程度と考えられる。

図-3.9には電気伝導度をてん充率に対してプロットした。いずれの現場でも両者にはとくに一定の関係は認められない。強いていえば、シリカゾル系の薬液でない場合、注入前の土では電気伝導度が $200\mu\text{S}/\text{cm}$ であるのに対し、多少たりとも注入材が含まれる土では電気伝導度が $500\text{--}2000\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲になることであろう。

以上の結果によれば、PHあるいは電気伝導度によっててん充率の概略値を推定することは困難であり、別の簡便法を検討する必要がある。

6. おわりに

前章で述べた土の非結晶性シリカを定量することによる薬液てん充率の測定法を注入による地盤改良を行った砂地盤に適用した。その結果、現場におけるてん充率の分布の実態が定量的に明らかになった。この種の調査はこれまで適当な方法がないため全く行われておらず、設計の際のてん充率の設定も根拠が明確ではなかった。今回の調査の結果、てん充率の分布は採用する注入工法によって異なり、均一性の高い浸透注入が可能な二重管ダブルパッカ-工法においても、てん充率は設計に用いている値よりかなり低く、50%前後であることが判明した。一方、二重管瞬結工法ではてん充率のばらつきの多い脈状注入が支配的であり、効果的な注入を行うためには脈の密度を高くする必要がある。いずれの注入工

法においても注入材は注入予定範囲の外へかなり逸失しており、限定注入が行われているとは言いがたい。

また、注入による地盤改良効果とてん充率の関係を検討した結果、強度は注入前の砂の状態、ホモゲルの強度、てん充率などに支配されることが判明した。さらに、簡便法としてのPHあるいは電気伝導度によるてん充率の推定は困難であり、これらの手法はごく定性的な用途に限定すべきであることも判明した。

以上の結果はごく限られた東京の沖積層および洪積層の砂に関する知見であり、現時点で一般化することはできない。今後さらに各種の地盤についてデータの蓄積を図るとともに、より簡便なてん充率の推定方法について検討する必要がある。

第四章 注入地盤における注入材の分布と地盤改良効果（２）

——滯水性砂礫地盤の場合——

1. はじめに

薬液注入工法による地盤改良では注入効果の予測方法あるいは判定法の確立が切望されており、そのための研究が各方面で行なわれているが、実用に耐えうるものはいまだ確立されていない。このため、薬液注入の計画、設計する際には現地地盤で試験注入を行ない、適正な注入率、材料の決定、注入効果の確認などを行なっている。著者は注入工法の設計、施工管理をより適切なものにするためには地盤内の注入材の分布を把握する必要があると考え、化学的手法による注入材分布の調査法^{57,58}を開発し、いくつかの適用例を報告している。先頃、滯水性砂礫層のシールド掘削の補助工法として二重管ダブルパッカー工法による全断面薬液注入工法が採用され、効果確認のための試験注入とこれにもとづく本注入による地盤改良が行なわれ、工事は成功裏に終了した。この工事では試験注入の際に従来から採用されている現場透水試験、標準貫入試験だけでなく、原位置引張り試験や固結体の掘り出しによる固結率の測定、注入材分布の調査などを行ない、これらの結果を本注入に反映されている。そして、シールド掘削の段階では定期的に切羽の注入材の含有量、すなわち充率を計測し、注入効果が不良の際の対策立案の参考にした。この事例は、砂礫層への二重管ダブルパッカー工法の適用を計画する際に有益な示唆を与えていると思われるので以下に紹介する。

2. 工事概要

2.1. シールド工事

工事は兵庫県揖保川流域下水道の管渠築造工事であり、一次覆工は無気圧・手掘り式のシールド工法により行なわれる。シールド掘削の規模は径2.64m、延長593 mであり、土被りは13.5～14.5mである。この工事では掘削対象が滯水性砂礫のため止水性確保を主目的とした薬液注入工法による地盤改良が計画された。

2.2. 土質

工事区域は兵庫県姫路市揖保川河口に位置し、その土質構成は図-4.1に示すように、沖積層は砂層、シルト層、砂礫層で構成され、シールド掘削対象はすべて

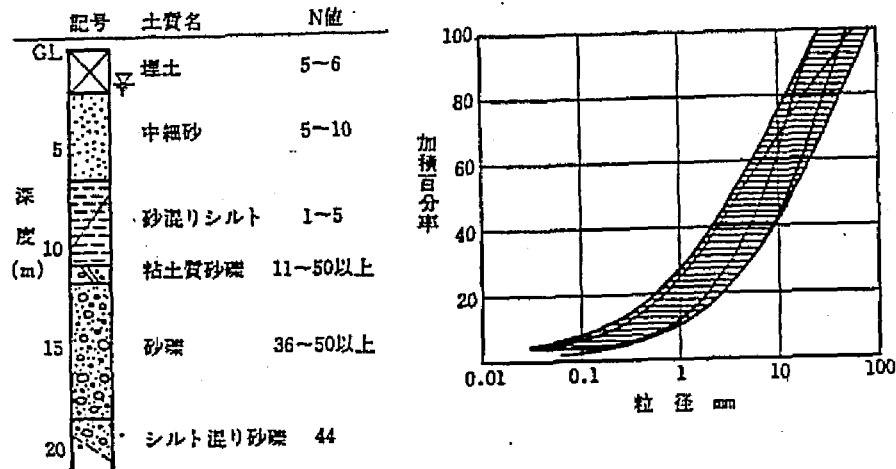


図-4.1 土質柱状図と砂礫の粒径分布

沖積砂礫層である。この砂礫層は細粒分が少なく、透水係数は 10^{-2} cm/secのオーダーであり、かつ被圧滞水層を形成しているため崩壊性が高い。そこで、シールド掘削を安全に行なうために透水係数を 10^{-5} cm/secのオーダーまで低下させ、また、切羽を自立しうる程度に強化することが改良目標とされる。

3. 試験注入

3.1. 調査計画

試験注入は発進堅坑予定地で行なわれた。その際、注入区を注入薬液の種類（施工会社）によって二分し、A、Bブロックとし、さらに注入深度GL-11.5 m~17.5 mを二分し、上部、下部とでCBの注入率を変えている。

試験で設定した注入率を表-4.1に示す。

調査、試験の項目は各施工段階

追って次のようなものを採用した。

	A ブ ロ ッ ク		B ブ ロ ッ ク	
	CB	コンソリデ-SG	CB	RSG-IV
上部	5%	23.6%	15%	23.6%
下部	10%	23.6%	10%	23.6%

表-4.1 設定注入率

(1) 注入作業中

注入圧力、注入量（流量）、
観測井水の pH、COD

(2) 注入作業後（掘削前）

現場透水試験、標準貫入試験、観測井の水質

(3) 堅坑掘削時

原位置引張り試験、一軸圧縮試験、簡易透水試験、固結率、てん充率測定。

このうち、原位置引張り試験は後出の図-4.3に示すように、切梁を支点としてチェーンブロックで径30~40cmの固結体を引張り、最大荷重と供試体の自重との差を求め、引張り強度を計算した。また、一軸圧縮試験も径30~40cmの供試体について行なった。固結率は固結体積を実測し、これと注入薬液量の比で表示した。てん充率は試料土の化学分析によって得た注入材含有量から計算によって求めている。

3.2. 注入経過

図-4.2に示すように各ブロック
12本の注入孔を千鳥状に配置し、
注入削孔、シールドグラウト

(CB) の充てん、養生、CBによる一次注入、溶液型注入材による二次注入の順で作業溶液型を行なった。注入速度は10ℓ/minとし33.3cmの1ステップとして18ステップ、33.3を連続的にステップアップする方式で注入した。注入圧は一次注入で1.5kgf/cm²、二次注入で広範囲に分布した。これはシールドグラウトの厚さ、養生日数、一次注入のCBの強度のバラツキなどを反映するものと思われる。

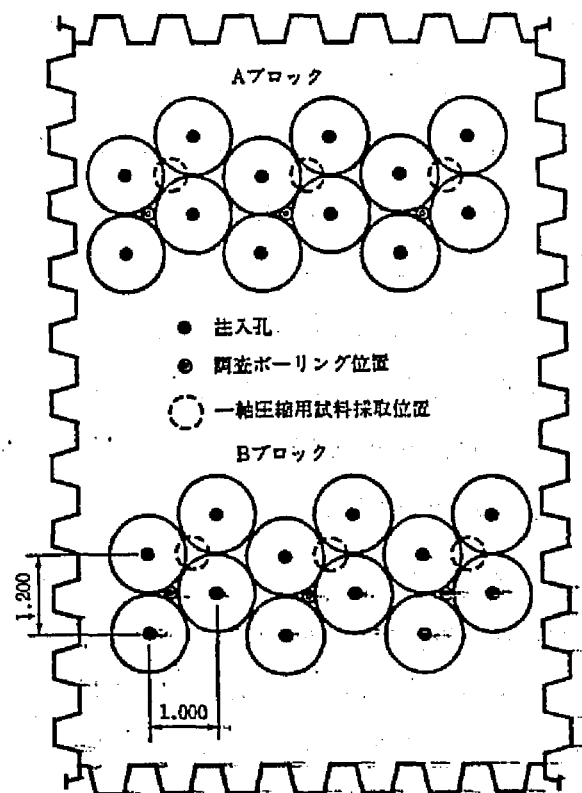


図-4.2 試験注入平面図

注入時の観測井（注入位置から最接近距離15m，合計 4本）の水質変化はほとんど見られなかった。すなわち、浅層地下水のpH、CODはそれぞれ7.3～7.4、14.5～16.2ppm、砂礫層内の地下水は7.5～7.7、7.6～8.9 ppm、の範囲にあり、注入前の水質に比べて有意な変化は認められなかった。

3.3. 注入効果

注入効果試験のうち、掘削前のものは注入後3日以後に、掘削時のものは注入後30～45日に行なった。これらの結果は表-4.2に一括して示す。

止水効果は注入前に 10^{-2} cm/sec のオーダーの透水係数が透のオーダーの透水係数が注入後には 10^{-5} cm/secあるいは 10^{-6} cm/secのオーダーとなり十分に認められる。ボーリングによる透水試験は各部3箇所ずつ、合計12箇所で回復法によって行なったが、A、Bブロックと

試 験 項 目		Aブロック		Bブロック	
		上 部	下 部	上 部	下 部
透水係数 cm/sec	注 入 前	1.6×10^{-2}		3.5×10^{-2}	
	ボーリング法	1.7×10^{-5}	4.8×10^{-5}	8.2×10^{-5}	6.2×10^{-5}
	簡易試験法	1.7×10^{-5}	4.6×10^{-6}	5.5×10^{-6}	2.8×10^{-6}
平均 N値	注 入 前	39	86	21	44
	注 入 後	153	169	86	133
一軸圧縮強度 tf/m ²		6.8	2.3	4.4	5.8
引張り強度 tf/m ²		0.25	0.5	0.46	0.15

表-4.2 注入効果一覧表

もに上部で1箇所ずつ止水効果の不十分な値が得られている。これらは共に端部で得られた値であり、注入範囲を代表する値とは思われず、大多数のデータが示す 10^{-5} cm/secのオーダーが注入範囲の透水係数といえよう。なお、簡易透水試験は掘削時に固結部に深さ40cm前後の穴を掘り、注水試験を行なったものであるが、一桁低い値が得られている。これは、ボーリング法では回復法、簡易試験法では注水法で行なっているが、一般に後者で目づまりの影響によって小さな値が得られるといわれており、今回の試験でも簡易試験の際の孔内水はかなり濁りが残留しており、この影響は無視できない。

強化効果のうち、N値については平均値が注入前に比べて2～4倍に増大している。玉石混りの砂礫層のN値については必ずしも信頼性は高くないが、このようなN値の増大は十分な強化効果を示すものと考えてよい。また、一軸圧縮強度は2.3～6.8tf/m²の範囲であり、N値から考えて著しく低く、また掘削時の供試体の整形にブレーカーを用いなければならなかったことを考えてもこの値は低い。これは砂礫への薬液の浸透に不均一性があり、同一供試体内でも固結程度に

差があるため、試験の際には弱い所で破壊が先行する。その結果、一軸圧縮試験は予想外に小さな値となっており、これは注入地盤の圧縮強度を過小に評価していると思われる。さらに、引張り強度は $0.5\text{tf}/\text{m}^2$ 以下と著しく低い。引張り試験の際のひずみ曲線を図-4.3に示しているように、引張りの過程で時々引張り力が低下し、局部的に破壊が進行することを示唆している。そして、この引張り力を供試体の全断面積で除しているたんに極めて小さな値となっていると思われる。

したがって、当現場の地盤のように不均一な地盤に、引張り試験を適用するには改良の余地を残しているいえよう。

以上、止水効果、強化効果ともに各注入区間に共通した差異は認められず、CBの注入率の差は注入効果には顕著な差をもたらしていないと考えられる。

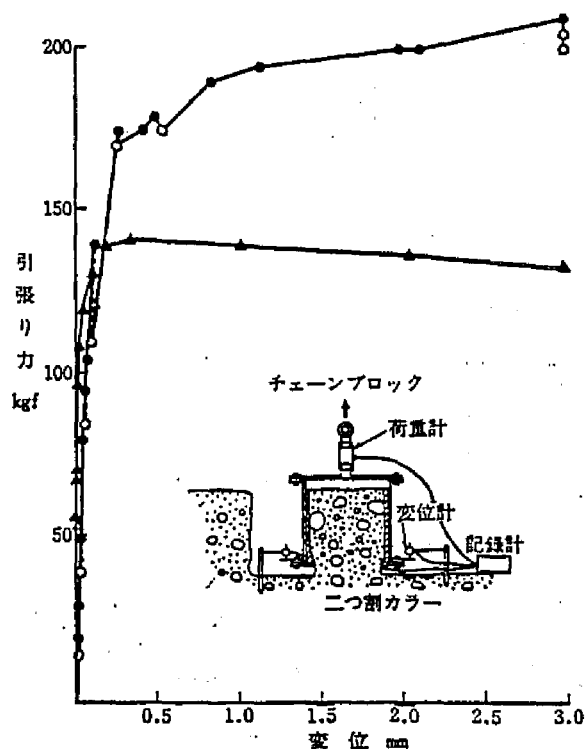


図-4.3 引張り試験方法と試験結果

3.4. 固結効果

堅坑の掘削時に薬液の固結状況を調査した。調査は3回に分けて行ない、第5次掘削に1回目、第6次掘削に2回目、第7次掘削に3回目の調査を行なっている。注入区間に入ると小型ブルドーザーのみによく掘削が困難となり、ブレイカーを用いて砂礫をほぐしながら掘削するようになった。そこで、高さ50cm程度に自立する範囲を掘り残し固結範囲とした。このようにして求めた固結範囲は図-4.4に示すように、Aブロックでは上部で固結面積が小さく、下部で大きくなるに
対し、Bブロックでは上部、下部の差が見られない。

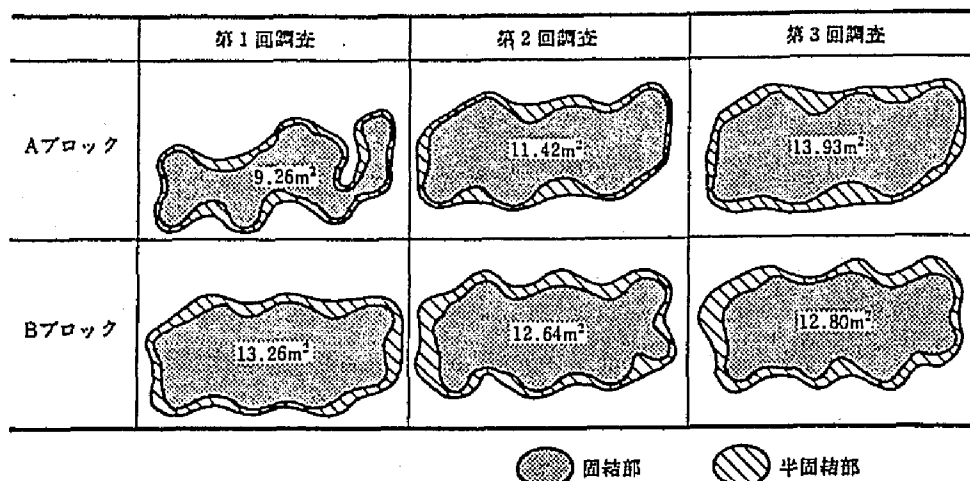


図-4.4 掘削時の固結範囲

これらの値を用いて求めた固結体積を注入薬液量で除して得た固結率は表-4.3に示すようにCBの注入率が5%のAブロックの上部で低くなる。次に、固結範囲から外周への薬液の浸透状況を示す薬液てん充率の分布を図-4.5に示す。てん充は上部すなわち5次掘削では注入孔の付近では60%前後のものが注入孔から離れるにつれて急激に低下するのに対し、下部（7次掘削）では注入孔から2m離れても40%前後の値であり、広い範囲に比較的均一に薬液が分布する。各区の固結範囲の平均てん充率を表-4.3に示しているが、二重管ダブルパッカー工法でもてん充率にはかなりバラツキがあることを考慮する必要がある。

3.5. 本注入への反映

試験注入の結果、二重管ダブルパッカー工法によって当現場の砂礫層は目標の 10^{-5} cm/secのオーダーの透水係数まで低下させることが可能であり、強化効果

測定項目	Aブロック		Bブロック	
	上部	下部	上部	下部
固結率	2.57	3.62	3.61	3.53
平均てん充率%	53.1	44.1	57.2	51.0

表-4.3 固結状況一覧表

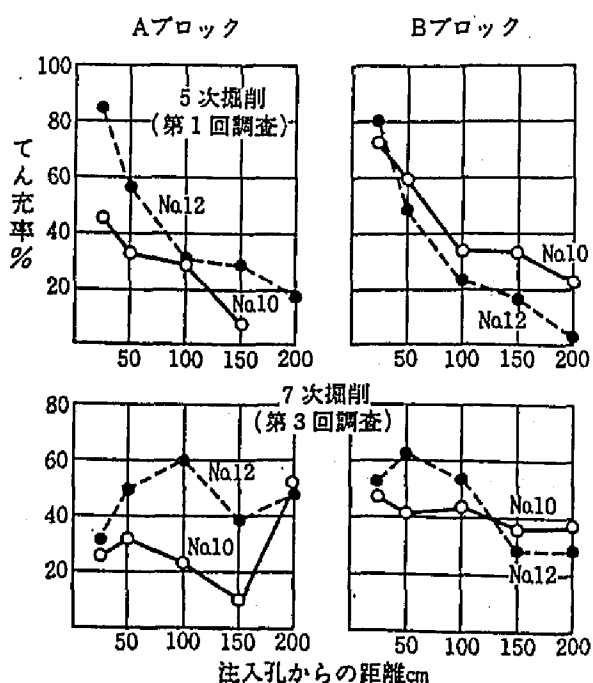


図-4.5 掘削時の注入材の分布

についてもN値および堅坑掘削抵抗から

判断して充分と考えられる。検討した一次注入(CB)の注入率の差異は薬液の固結率の差として現われ、CBが10%以上ならば3.5前後の固結率となることが判明した。そこで、本注入でCBを10%、溶液を23.6%の注入率を採用することにした。

次に、注入地盤の注入効果は図-4.6に示すようにおおまかな傾向として地盤内の薬液てん充率に支配されている。図-4.6(1) 本注入部の値もプロットしているが透水係数が 10^{-5} cm/secの

オーダーを安定して確保するにはてん充率が50%以上を必要とする。また、図-4.6(2)の固結程度もてん充率が50%以上では大半が固結している。したがって、注入範囲内がてん充率で50%以上となるように注入する必要があり、シールド掘削の際には掘削切羽の土砂につい

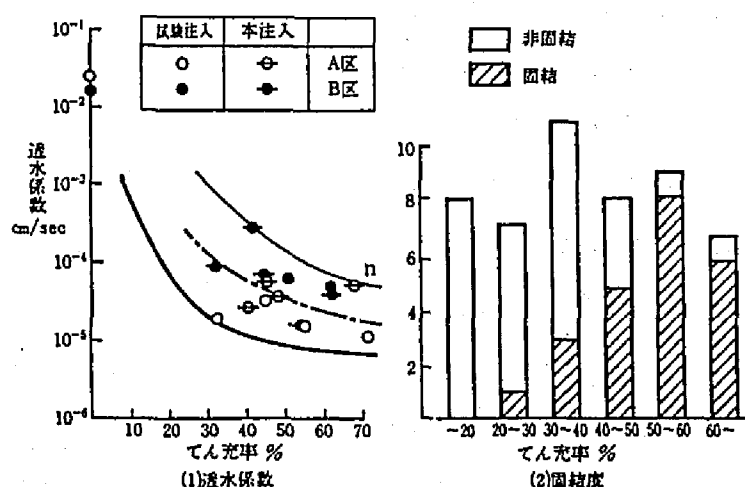


図-4.6 注入効果とてん充率の関係

て薬液てん充率を定期的に測定、チェックすることにした。

なお、当初計画では本注入の注入断面は切羽部には注入せず、この周囲に注入することになっていた。これは薬液の浸透が1m以上に及び切羽の側部、上部に注入した薬液が浸透することを期待している。試験注入の結果でも図-4.5に示されるように、浸透範囲は2mに及んでいる。したがって、当初計画の注入断面でも切羽での注入効果は十分に期待しうると判断した。

4. シールド掘進部の地盤改良効果

4.1. 注入工事

管路部の注入は試験注入の結果を踏まえ、注入率はCB10%、溶液23.6%とし、全区間を二区に分け、A区でコンソリダーSG、B区でRSG-IVを溶液注入材として使用した。注入断面は図-4.7に示すタイプとし、施工手順などは

試験注入と同様としたが、シールドグラウトの養生日数は2日以上とした。注入圧は図-4.8に例示するように、試験注入の場合と同様にバラツキが大きく、特に二次注入の変動範囲が大きい。注入圧とステップとの関係も一様でなく、下部で高くなる孔や途中で高い圧力になる孔がある。周辺の観測井の水質はpHが7.6～7.7、CODが7.8～8.7ppmの範囲で注入前の値と変らなかった。

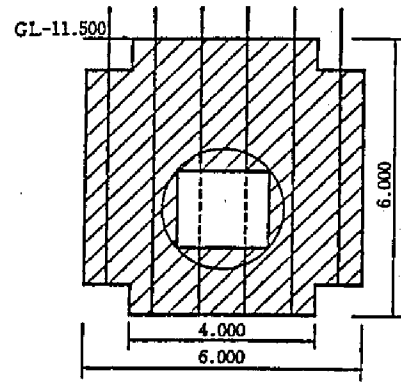


図-4.7 薬液注入断面

4.2. 注入効果の確認と掘削

注入後の掘削に先行して50mに1本の割合でチェックボーリングを行ない、深度13.5～16.5mの範囲で現場透水試験を行なった。その結果、土質はシールド掘削の対象となるGL-13.5～16.2mで砂礫を主体とし、透水係数は大部分が 10^{-5} cm/secのオーダーにあり、1例のみ 3.4×10^{-4} cm/secと

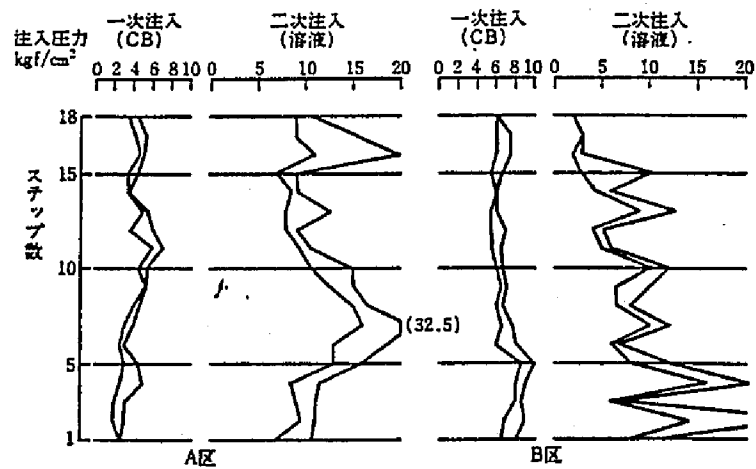


図-4.8 注入圧変化の例（最大値と最小値）

なった。そこで透水係数が目標値に達しなかった部分については溶液タイプの補足注入を行なった。

シールド掘削は一部を除いて順調に進行した。すなわち、切羽からの湧水は2～3 l/minと少なく、透水係数から予測される湧水量と近似、また強度も硬すぎない程度に充分であり、切羽には注入した薬液のホモゲルが礫間に散在していた。

掘削土砂内の薬液の含有量を求め、これから注入材による間隙てん充率の推移を見たものが図-4.9である。図中に示したように、A区、B区ともに平均てん充率は50%をうわまわり、当初の目標値を満足している。しかしバラツキがかなり大きく、所々に極めて低い値も見られる。ともあれ、図-4.7に示したように切羽

には直接注入はしていないにも拘らず、注入効果の発現にほぼ十分な薬液が切羽に浸透している。これは、ゲルタイムの長い注入材を用いる二重管ダブルパッカー工法の選定が当地盤では適切であったことを示している。

4.3. 切羽崩壊事故の原因と対策

上述のように掘削は大半の区間で順調に進行したが、一部区間約30mの間で局部的な湧水および3回の切羽崩壊を生じた。原因として土質の急変、注入時の削孔精度の不良、薬液の硬化不良などが考えられた。土質については図-4.10 に切羽のスケッチを示すように、

それまでと異なり、砂礫を基調とするものの、砂および粘性土塊を含み、しかも

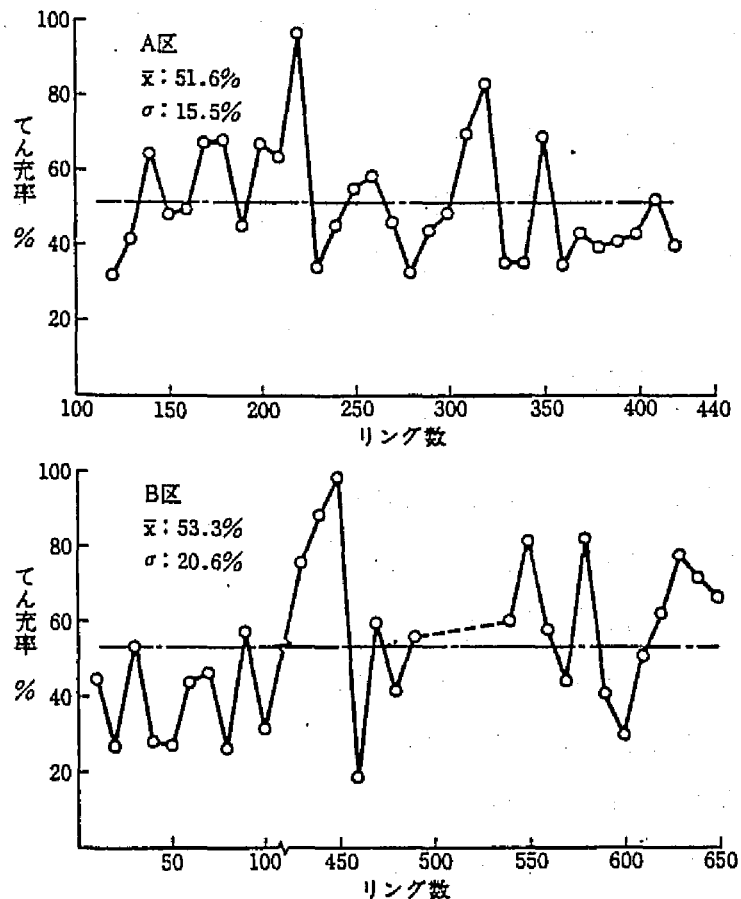


図-4.9 掘削中の切羽土砂のてん充率

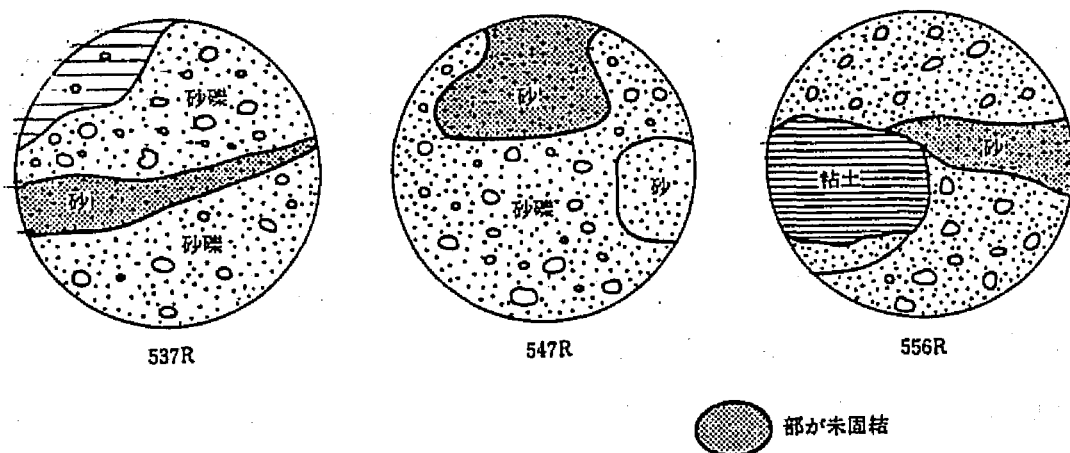


図-4.10 崩壊部の切羽のスケッチ

これらは成層せずブロック状に入っている。そして、このうち砂の一部が未固結であり、薬液てん充率も砂礫の部分は50%前後であるのに対し、未固結砂では20%未満であった。これらの砂、砂礫の粒径分布を図-4.11に示す。同じような粒径分布の砂でも固結した砂もあるが、砂が砂礫に比べて薬液が浸透しにくいことは事実であろう。しかも、当現場では切羽には直接注入をしていないため、砂への薬液の浸透が阻害されたものであろう。

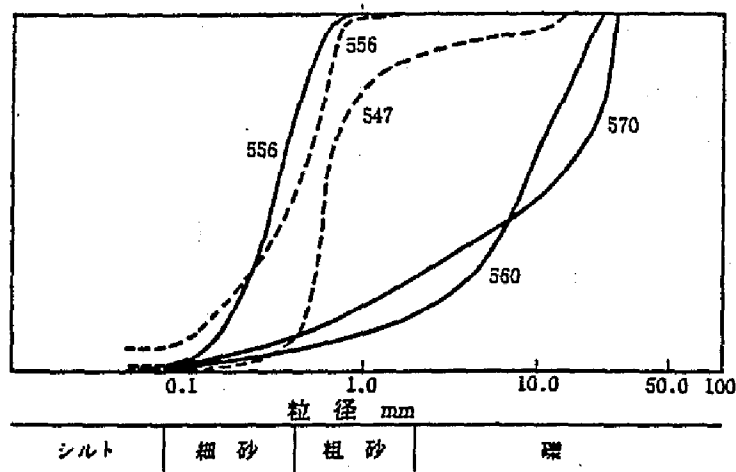


図-4.11 崩壊部の切羽土の粒径分布
(点線は図-10の未固結砂)

他の原因として考えられた薬液の硬化不良については砂でも薬液含有量の多い、すなわちてん充率の高いものは固

結状であることから否定される。また、削孔精度については試験注入の際の調査でG L-18 m、付近で最大50cmのズレを示すことから、削孔精度不良が重なると局部的に改良効果不良を生じることはありうるが、薬液の浸透性が良好なため、今回のようなポケット状の未固結欠陥部は生じにくいと考えられる。

以上のような検討結果にもとづき、他の区間と異なり砂をブロック状に含む切羽には路上あるいは坑内から瞬結性の薬液を補足注入した。これは、ゲルタイムの長い薬液では浸透性の高い砂礫層へ薬液が逸走するため、逸走する前にゲル化されるためには瞬結性薬液の方が有利との判断によるものである。その結果、湧水、崩壊ともに再発することなく掘削工事は終了した。

5. おわりに

滞水性砂礫層のシールド掘削の補助工法として、二重管ダブルパッカー工法による全断面薬注を採用した事例について、試験注入および本注入の経過と地盤改良効果を紹介した。結果的には二重ダブルパッカー工法の適用が成功したといえるが、当初予期せぬ土質の急変区間の事故の防止法の確立など改良の余地もある。そのため、注入効果の予測が不可欠であり、完全なものでなくとも、何らかの手法の開発は急務といえる。

第五章 注入地盤における注入材の分布と地盤改良効果（3）

——注入材分布から見た注入工法の比較——

1. はじめに

薬液注入工法による地盤改良は広く普及しているが、その効果の予測方法は現在各方面で検討されている。筆者らはこの数年、注入工法の設計、施工を合理的化するうえで、注入した薬液の地盤内における挙動を明らかにすることが不可欠と考え、注入地盤内の注入材の分布状況を調査してきた。先般、シールド工法の補助工法として薬液注入工法が採用される現場において、施工条件、土質に応じて注入工法が採用される現場において、施工条件、土質に応じて注入工法を選択することになった。その際、最新の工法も含まれることもあって試験注入を行ない、各種注入工法の地盤改良効果だけでなく、地盤内の注入材分布状況を調査した。また、シールド掘削中の掘削切羽の安定、湧水の状況を調査するとともに切羽における注入材の分布との関連を検討した。これらの結果は今後の注入工法の設計あるいは施工管理に貴重と思われるものを含んでいるので、以下に調査の概要を紹介する。

2. 工事現場の概要

2.1. 工事と注入の目的

工事は下水幹線管渠をシールド工法によって建設するもので、その諸元は次の通りである。

シールド延長 733 m

掘削径 2.2 m、仕上り径 1.5 m

土被り 8～10 m

掘削形成式 手掘り（低圧気併用）

路線は地下鉄、県道、河川などを横断し、また地上部には民家が密集しているため、構造物の防護、地表沈下の防止は不可欠の課題とされた。土質は後述のように透水性の大きい洪積砂層を主体とし、湧水の防止が必要とされた。これらを考慮して、砂層、砂礫層掘削区間では止水性の向上、シルト質土層掘削区間では強度増加を主目的として注入工法を採用した。

2.2. 土質

土質は注入区間約 280 mのうちでかなり変動し、図-5.1に示す土質柱状図のAからDへと変化する。注入区間の当初はシールド切羽の土質は沖積層のシルト質砂、砂でありN値は低く、強度増加が求められる。注入区間の中盤以後は柱状図のC、Dとなり、洪積層の砂、砂礫が掘削の対象となる。これらの層は透水係数が 10^{-3} cm/secのオーダーにあり、滞水層を形成している。

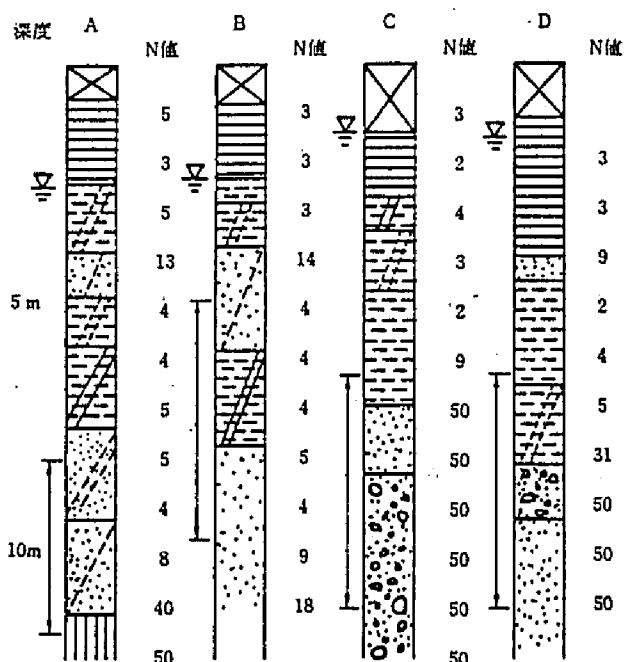


図-5.1 土質柱状図 (矢印は注入範囲)

2.3. 注入工法

当現場の土質、施工条件の多様性、経済性等を考慮して、以下に示す4種の注入工法の採用を考えた。各注入区間で採用する注入工法の種類は試験注入の結果を見て判断することとした。

- A. 二重管式瞬結工法 (LAG工法)
- B. 二重管式ダブルパッカー工法 (ソレタンシュ工法)
- C. 二重管式交互注入工法 (瞬結性薬液 (S) と緩結性薬液 (L) を1ステップごとに交互に注入する工法)
- D. 多重管式同時複合注入工法 (注入ロッドの上部吐出口から瞬結性薬液 (S)、下部吐出口から緩結性薬液 (L) を同時に注入する工法)

3. 試験注入

3.1. 注入計画

試験注入の概要を表-5.1に示す。表中にあるように、上述の4工法と比較するため単管ロッド注入も行なっている。注入率は38%を中心に行っている。注入孔は4孔あるいは5孔で、中心に貫入試験等を行なう調査孔を設けている。交互注入

注 入 工 法	二重管瞬結工法	ソレタンシュ工法	交互注入工法	複合注入工法	単管ロッド工法
注 入 材	PG-3 (GT:3秒前後)	CB RSG-III (GT:60分前後)	エヌタイト5S-1 (GT:5秒前後) エヌタイト1 (GT:3~6分)	サイマル1号 (GT:5秒) サイマル1号 (GT:3~10分)	エヌタイト3号 (GT2~3分)
注 入 率	35, 38, 41%	CB 5% RSG III 38%	35, 38, 41%	35, 38, 41%	41%
注入速度	12 ℓ/min	10 ℓ/min	15 ℓ/min	瞬結 8 ℓ/min 緩結 8 ℓ/min	20 ℓ/min
1ステップ長	連続回転(8rpm)	33.3cm	50cm	25cm	50cm
注入範囲	GL -8.0~10.7m	GL -4.856~9.600m	GL -6.3~11.044m	GL -6.3~11.044m	GL -6.3~11.044m
注入対象土	沖積砂層(細砂)		洪積砂層(粗砂), 砂礫層		
注入孔配管 ●調査孔 ○コアボー リング孔	1,000 1,000	1,000	1,000 1,000	1,000 1,000	1,000 1,000

表-5.1 試験注入一覧表

工法、複合注入工法ではコアボーリング孔も配している。なお、複合注入工法は瞬結性薬液と緩結性薬液の比を任意に設設できるが、今回の試験注入では1:1および3:2を採用した。

3.2. 注入施工

注入時の圧力チャートの例を図-5.2に示す。二重管瞬結工法では注入深度と無

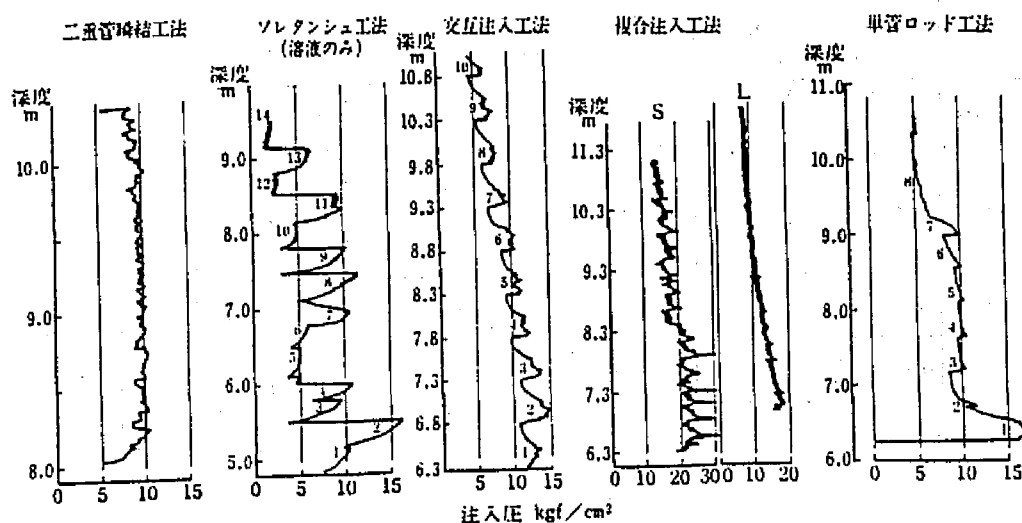


図-5.2 各注入工法の圧力チャートの例 (チャートの添字はステップ数)

関係にほぼ10 kgf/cm²の圧力を示すのに対し、交互注入、複合注入、単管ロッド注入の各工法ではステップアップするにつれて注入圧が減少し、土被りの影響を強く受けている。ソレタンシュ工法では各ステップ内、ステップ間の圧力差が大きく、スリーブグラウトおよび先行して注入した一次注入のCB（セメントベントナイトミルク）の硬化体を割裂するのに高圧を必要としていることを示している。なお、注入は4孔あるいは5孔で行なっているため、当初の注入孔と最終の注入孔では圧力パターンが変化すると思われるが、このような現象が認められたのは交互注入、複合注入、単管ロッド注入工法である。これらの工法では後行の注入孔では先行のものより注入圧が高くなり、隣接注入孔から薬液が浸透してきていることを示している。

3.3. 注入効果

(1) 標準貫入試験 表-5.2に注入効果をまとめて示している。貫入試験によるN値は注入対象土の土質が工法によって異なるので全工法を比較することはでき

工 法	注入区	設 定 注入率	標準貫入試験 N値	現場透水試験		土 質 試 験					備 考
				土 質	透水係数cm/sec	土 質	qu kgf/cm ²	C kgf/cm ²	ϕ	γ g/cm ³	
注入前			シルト質砂 4~5 砂質シルト 5 砂礫、粗砂 N>50(75)	砂礫 粗砂	3.9×10^{-3} 3.9×10^{-3} 5.3×10^{-4} 8.6×10^{-4}	シルト混り砂				1.75	
二 重 管 噴 霧 工 法	A-1	35.6%	シルト質砂 9	シルト混り砂	1.0×10^{-4}	シルト質砂	0.76	0.35	12.3°	1.72	
	-2	38.6%	シルト質砂 7	シルト混り砂	4.2×10^{-5}	シルト質砂	1.37	0.44	25.1°	1.74	
	-3	41.7%	シルト質砂 7	シルト質砂	1.2×10^{-4}	砂質シルト	1.05	0.44	9.2°	1.73	
ソレタン シュ工法	B	43.1%	シルト質砂 13	シルト混り砂	4.0×10^{-5}	シルト混り砂	1.65	0.55	22.9°	1.84	
交 互 注 入 工 法	C-1	35.0%	砂質シルト 効果なし 砂礫、粗砂 187	砂 礫 粗 砂	5.2×10^{-5} 4.1×10^{-4}	粗 砂	1.03	0.35	30.2°	1.95	
	-2	38.0%	砂質シルト 効果なし 砂礫、粗砂 100	砂 礫 粗 砂	8.9×10^{-5} 9.4×10^{-5}	"	0.94	0.32	28.9°	1.93	
	-3	41.0%	砂質シルト 10 砂礫、粗砂 166	砂 礫 粗 砂	5.5×10^{-5} 7.8×10^{-5}	"	1.21	0.41	30.2°	1.99	
	S-1	35.0%	砂質シルト 7 砂礫、粗砂 89	砂 礫 粗 砂	3.2×10^{-5} 6.0×10^{-4}	粗 砂	2.03	0.58	32.1°	2.00	凝結(S)と 凝結(L)の 比 1 : 1
	S-1	38.0%	砂質シルト 20 砂礫、粗砂 169	砂 礫 粗 砂	5.2×10^{-5} 9.0×10^{-5}	"	2.86	0.79	31.5°	2.10	1 : 1
	-2	38.0%	砂質シルト 効果なし 砂礫、粗砂 125	砂 礫 粗 砂	2.2×10^{-4} 4.6×10^{-5}	"	3.16	0.82	31.1°	2.10	3 : 2
複 合 注 入 工 法	S-1	41.0%	砂質シルト 9 砂礫、粗砂 112	砂 礫 粗 砂	1.3×10^{-4} 6.2×10^{-5}	"	3.00	0.85	32.0°	2.16	1 : 1
	-2	41.0%	砂質シルト 効果なし 砂礫、粗砂 165	砂 礫 粗 砂	3.4×10^{-5} 3.8×10^{-5}	"	3.72	0.95	32.2°	2.13	3 : 2
		41.0%	粗砂 88	粗 砂	5.3×10^{-4}	粗 砂	0.36	0.12	20.3°	1.90	

表-5.2 注入効果総括表

ないが、シルト質砂に対しては二重管瞬結工法、ソレタンシュ工法が効果があり、特に後者ですぐれている。砂質シルトに対しては交互注入工法、複合注入工法とも余り効果的とは言えない。洪積層の粗砂、砂礫は注入前からN値が50以上であるが、換算N値で示せば各工法とも効果があり、特に複合注入工法の効果がすぐれている。各工法ともに、注入効果と注入率との関係は必ずしも明瞭ではない。

(2) 土質試験 注入前の土質試験データが砂を主体とするため得られないが、 q_u は 0.2kgf/cm^2 以下と思われる。これに対し、注入後はいずれの工法でもかなりの値を示し、特に高い値を示すのが複合注入工法、低い値を示すが単管ロッド工法である。また、三軸圧縮試験の粘着力 C は $0.12\sim 0.95\text{ kgf/cm}^2$ と広く分布し、 q_u/C は粗砂で $2.9\sim 3.9$ に分布し、平均 3.3 である。内部摩擦角 ϕ は粗砂で 30° 前後のものが多い。

(3) 現場透水試験 試験はシルト混り砂、砂礫の各層で行なった。シルト混り砂は当初から 10^{-4} cm/sec のオーダーにあるが、二重管瞬結工法では必ずしも十分な効果は得られず、これに対し、ソレタンシュ工法では十分な値となる。粗砂に対する注入効果はいずれの工法でも認められるが、単管ロッド工法では目標の 10^{-5} cm/sec オーダーには及ばない。また、砂礫に対しても半分以上の区で 10^{-5} cm/sec オーダーまでの低下が見られる。これらの止水効果と注入率の関係は必ずしも明瞭ではない。

以上の注入効果を総合的に考えると、沖積砂層の改良を目的に設定した二重管瞬結工法とソレタンシュ工法では後者の方がすぐれ、粗砂、砂礫の改良を目的とした交互注入工法と複合注入工法では、やや後者がすぐれているといえる。

なお、複合注入工法で強度増大効果が特にすぐれている理由には、本工法ではホモゲル強度の大きい注入材を用いていることがあげられる。また、複合注入工法では瞬結性薬液(S)と緩結性薬液(L)の比率の影響も検討しているが、 $1:1$ と $3:2$ とでは効果に有意な差は認められない。

3.4. 薬液の浸透状況

今回の試験注入では交互注入、複合注入の区ではコアボーリングを行ない、各土層においける薬液の浸透状況を観察することができた。すなわち、得られたコアを二つ割りして内部への脈の入り具合、フェノールフタレイン反応による

薬液の粒子間浸透の有無を観察し、図-5.3のようなスイッチを得た。また、各

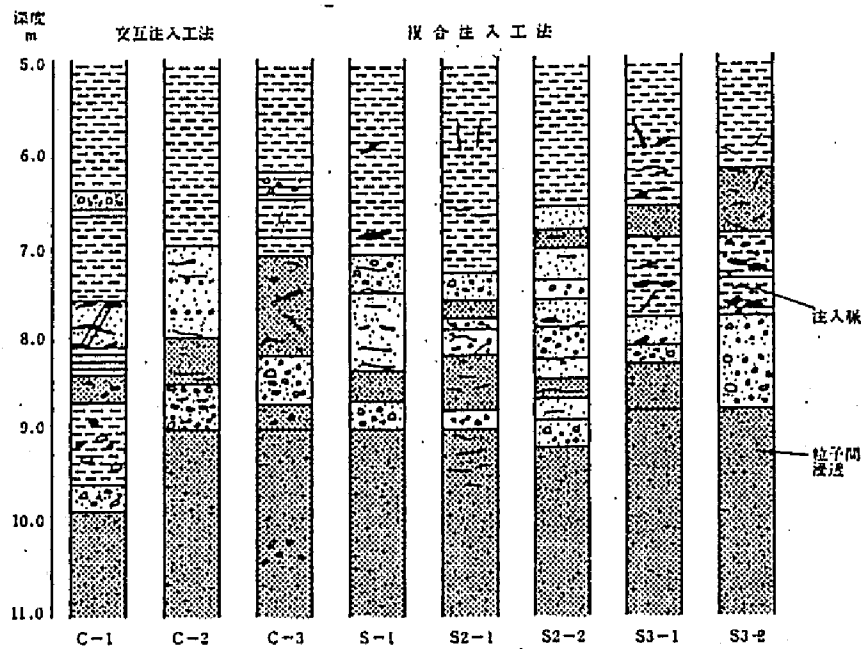


図-5.3 コアのスケッチ

土層で脈状浸透（割裂注入を含む）と粒子間浸透の割合を求めて図-5.4に示した。

これらによれば、粗砂、中砂では粒子間浸透を主体とするが、砂礫、細砂では両者が平行し、やや脈状浸透がまさる。シルト質あるいは有機質の砂では脈状浸透を主体としている。脈状浸透を主体とする土層の脈の厚みは1~15mmと幅が広いが、シルト、有機質のもので3mm以上のものが大半を占めるのに対し、細砂、砂礫では3mm以下のものを主体とする。

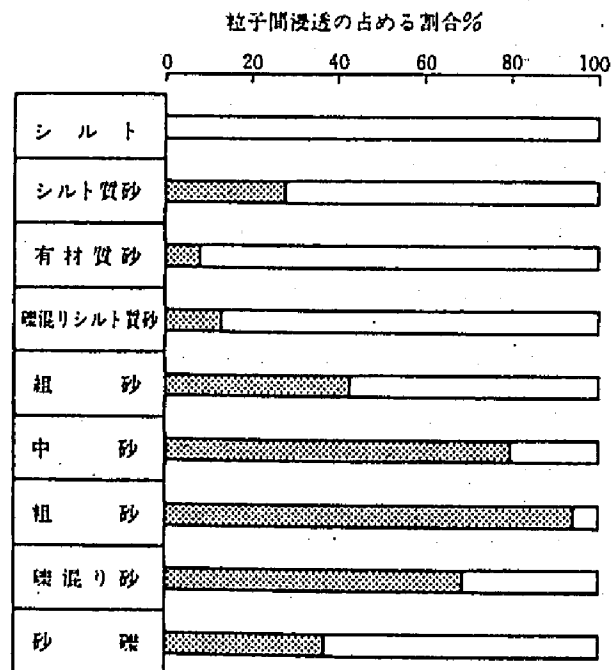


図-5.4 各土層の浸透様式

3.5. 薬液てん充率の分布

図-5.5に各区のてん充率の垂直分布を示す。瞬結工法とソレタンシュ工法

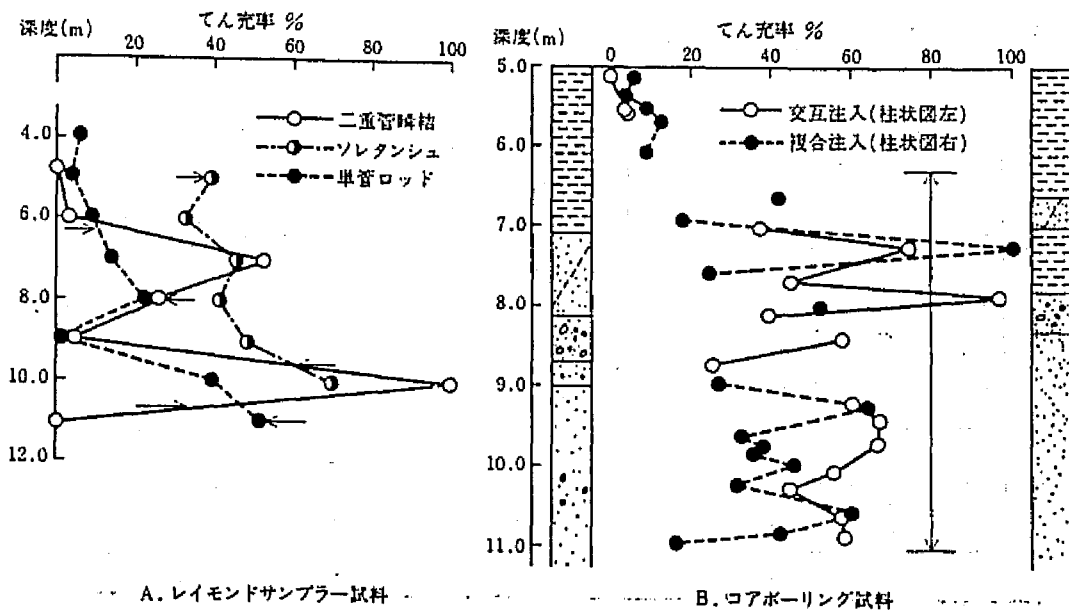


図-5.5 てん充率の垂直分布の例

は、前出（図-5.1）の柱状図A、Bの土質を示すが、前者の工法ではてん充率のバラツキが著しいのに対し、後者のソレタンシュ工法では50%前後の安定したてん充率分布を示す。単管ロッド工法では土質は柱状図Dに近いが、全般的にてん充率の値が低く粘性土層以外でもバラツキが大きい。交互注入と複合注入の区ではボーリングコアについての分析結果を示しているが、いずれの工法でもGL-7~8.5 m付近でのてん充率のバラツキが大きく、この範囲では脈状浸透を主体としている観察結果と対応している。下部の粗砂層では交互注入区で平均てん充率が50.8%複合注入区で40.1%であり、変動係数はそれぞれ13.5%、33.1%であり、交互注入区でより安定した分布を示す。なお、各工法とも注入範囲の上部にも注入材がかなり検出され、上部への逸失を示している。

4. シールド掘進部の注入効果

4.1. 注入区の設定

本注入は注入区間を土質、施工条件、近接構造物の重要度などによって5区に分け、それぞれの区に応じて工法を選定した。切羽の湧水の懸念されない粘性土の区間（A工区）では二重管瞬結工法、地下鉄の直上を横断する区間（B

工区)ではソレタンシュ工法を採用した。また、住宅密集地の下を通過する区間(C-1工区)では沈下防止のためCCPと交互注入工法を併用し、河川横断部とその前後(C-2、D、E工区)では複合注入工法を採用した。各注入区の注入断面は後出の表-5.3に示す。注入率は各区とも38%としている。





工区	注入工法	注入断面	土質	注入効果と注入材の浸透状況
A	二重管瞬結工法		シルト 砂 土丹	シルト、砂層では割裂脈状注入、層境に太い脈、湧水、土砂崩落見られず。
B	ソレタンシュ工法		砂質シルト 砂礫	砂質シルト層では細脈が高密度に入る。砂礫層では脈状注入と粒子間浸透が並行。切羽からの湧水、土砂崩落は全く見られない。
C-1	交互注入工法		シルト 砂から砂礫	シルト層では細脈中心の脈状注入。砂、砂礫層では粒子間浸透。切羽からの湧水、土砂崩落は見られない。
C-2 D E	複合注入工法		粗砂 後半砂礫	同一切羽内で固結状況に変化。固結部と非固結部が見られ、固結部は高強度であるが、非固結部から最大120 l/minの湧水。

表-5.3 各注入区の掘削切羽の状況

4.2. シールド掘削時の切羽の状況

シールド掘削の際の切羽の観察結果を表-5.4に示す。瞬結工法区では切羽より上部に注入されているが、薬液の脈が切羽にも見られ、注入効果が認められる。

ソレタンシュ工法区では切羽は均等に改良され、試験注入の結果とも一致する。複合注入工法区では瞬結性薬液と緩結性薬液の比を1:1で注入しているが、一部区間で予想をうわまわる湧水があり、その原因と対策を検討した。

リング数	一軸圧縮強度 kgf/cm ²	透水係数 cm/sec	てん充率 %
947	1.02	4.6×10^{-7}	64.4
947	1.76	—	52.6
957	0.83	—	32.4
965	1.15	—	80.9
975	自立せず	—	20.9
985	*	—	16.2
988	1.14	8.6×10^{-7}	58.7
1,000	0.57	6.3×10^{-7}	38.7
1,080	4.41	1.4×10^{-6}	67.2

表-5.4 切羽の砂の物性と薬液てん充率

4.3. 湧水の発生とその原因

図-5.6に示すように、C-2工区の後半から当初の予想湧水量(3~4 l/min)をうわまわり、何ヶ所かでは湧水だけでなく土砂の流出を招くに至っ

た。切羽の土質は粗砂、砂礫が頻繁に現われ、変動が著しい。湧水は切羽の端部の固結度の低い所から発生しており、このような部分が何リングか連続して発生する。これらに対する処置として、湧水の激しい所では坑内から瞬結性薬液を補注入した。

湧水発生区間の切羽から採取したブロックについて薬液てん充率を求めた結果を図-5.6に併記しているが、同一の切羽の中でてん充率の高低差が激しく、

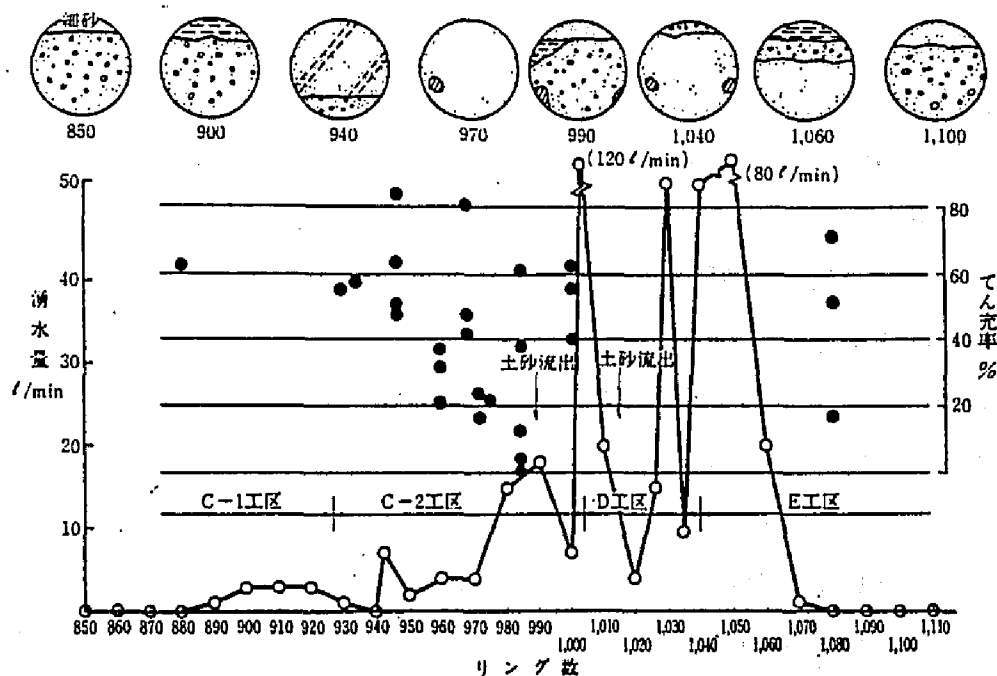


図-5.6 後半部の湧水量と切羽の土質および薬液てん充率

一部では20%以下となる。このような所では注入効果も乏しく、砂は固結化していない。

このような未固結部は何リングか連続する傾向にあった。したがって、湧水の発生原因は薬液の浸透不良にもとづく未固結部の発生といえる。

5. 考察

5.1. 注入材の浸透限界

交互注入工法、複合注入を工法の区ではボーリングコアについて浸透形態の観察を行ない、その結果を3.4に述べた。水ガラス系薬液の浸透限界については各種の文献に紹介されているが、瞬結性薬液と結緩性薬液を併用する工法では調査

例が少ない。そこで、浸透形態と各土層の粒径分布を図-5.7に示す。図中の粒径分布曲線は注入後の土砂から薬液を抽出除去して求めたもので、10%粒径 (D_{10}) が0.005mm以上の中砂、粗砂では粒子間浸透が主体となる。砂礫は D_{10} が大きいにもかかわらず脈状浸透の割合も

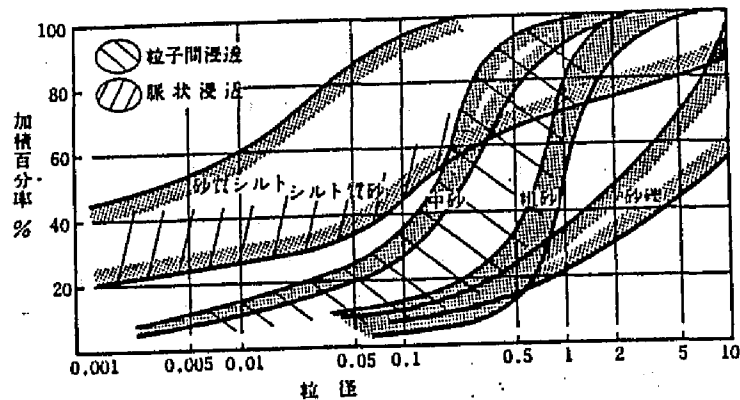


図-5.7 各土層の浸透様式と粒径分布

高くなるのは砂礫中のマトリックス部分 (例えば 2mm 以下) での D_{10} はかなり小さくなるからと思われる。一方、細粒分 ($<74\mu$) が40%以上のシルト質砂、砂質シルトなどでは脈状浸透を主体とする。

5.2. 注入材の分布と注入効果

注入材の分布と注入効果の関係については図-5.8に試験注入の砂層における結果を示す。透水係数とてん充率の関係は注入工法の種類を問わず共通しており、透水係数を 10^{-5} cm/sec のオーダーとするのに必要なてん充率は40%前後である。これは、既報の現場調査室内実験で得られた結果に比べるとやや低い値であり、粗砂層が均質に改良されたことを示唆している。

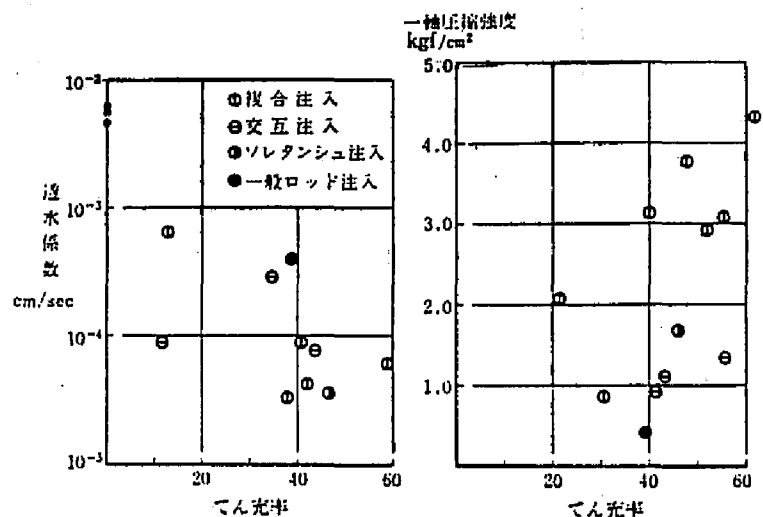


図-5.8 注入効果とてん充率の関係 (試験注入)

一方、強度については土層の共通した交互注入工法、複合注入工法では同一てん充率では複合注入工法の方が3倍近い値となる。これは、複合注入工法では水ガラス濃度が他工法の1.5倍とした高強度薬液を用いていることにも由来する。

表-5.4にはシールド切羽 (複合注入工法区) がブロックサンプルの物性とてん

充率を示す。これによれば、定水位法で求めたブロックの透水係数は $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/secと低く、試験注入時の現場揚水試験による値の1/10から1/100 となっている。一方、強度はてん充率が50%以上のもので1 kgf/cm²前後と試験注入時の値に比べてかなり低い。なお、てん充率が25%未満では砂は固結状態を維持できない。

5.3. 複合注入工法への適切な対応

当現場では全注入区間の約半分に複合注入工法を適用し、ほぼ満足できる結果を得たが、一部に薬液の浸透不良部が発生した。複合注入工法では緩結性薬液（L）と瞬結性薬液（S）の割合が任意に調節しうるが、ここではS/Lを1：1として施工した。そこで注入した土砂のS/Lを化学分析によって求め、てん充率との関係を求めたのが図-5.9である。

これによれば、S/Lを1としているにもかかわらず、Sばかりの所やLばかりの所が見られる。土塊の粗間隙にSが浸透し、細かい間隙にはLが浸透するというのが複合注入工法の特徴であるが、今回の調査では必ずしもこのようになっていない。図-5.9によれば、てん充率が最大値を示す時のSの割合は75%（ $L/S + 1 = 0.25$ ）前後であり、Sが多すぎても、Lが多すぎ

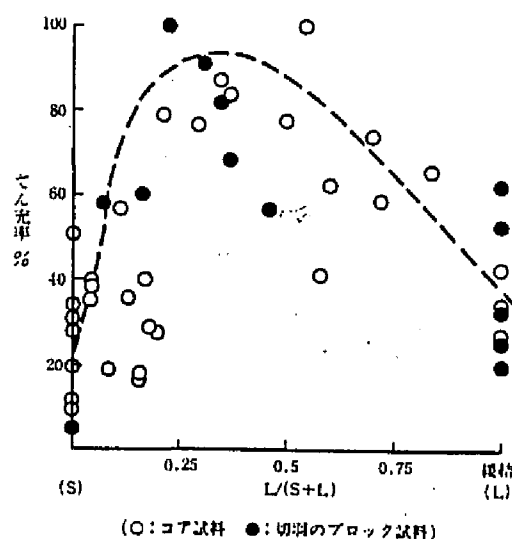


図-5.9 注入土のてん充率とS/Lの関係

てもてん充率は低下している。したがって、複合注入工法では最適なS/Lが存在し、この値は土質等で異なると思われるが、当現場では3：1前後が妥当であったと推察される。

なお、固結砂のS/Lが計画通りになっていない理由としては、先行注入されるLがSによるホモゲル強度が高すぎて、後に注入されるLがSによる固結土を割裂浸透しないで、Sの少ない所へ逸出して浸透していることが考えられる。したがって、Sのホモゲル強度を低下させることも有効と思われる。

6. あとがき

土質、施工条件、近接構造は物の種類等が複雑に変化するシールド工事において、これら諸条件を考慮した注入工法の選定が望まれた。そこで、5種の注入工法について試験注入を行ない、各工法の注入効果を確認するだけでなく注入材の分布性状を調査した。また、本注入を行なった区間で生じた湧水事故の原因を調査し、複合注入工法採用に当たっての留意点を明らかにした。

第六章 温度計測による注入効果推定に関する基礎実験^{6,9,70}

1. はじめに

第二章から第五章にのべてきたように、てん充率の測定法として非結晶性シリカの化学分析による方法を開発し、実際の注入地盤に適用した。その結果、注入による地盤改良効果は地盤の間隙を充填する注入材の含有量すなわちてん充率に支配されることが判明した。しかし、この方法はアルカリによるシリカの抽出、抽出したシリカの化学分析という操作が必要なため工事現場で注入作業中に結果を得ることは不可能である。すなわち、注入効果判定法に求められる簡便性、即時性に欠ける。

一方、すでに開発されている電気抵抗による方法^{71,72}、中性子水分計による方法⁷³などは現場での測定が可能であるが、得られた結果からてん充率のような地盤改良効果と関係の深い数値を推定することは不可能であり、効果推定の精度、適用性に問題を残している。

ところで、現在薬液注入工法に用いられる薬液は水ガラス系に限定されている。水ガラス系注入材のゲル化の機構あるいは反応を考えると、硬化する過程で何等かの熱変化を伴うことが予想される。そこで、市販のいくつかの注入材について反応時の温度変化を測定したところ、かなりの温度上昇を生じることが判明した。この現象を利用して注入材の浸透状況を推察することができないかについて、一連の室内実験を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材料

i) 注入材

表-6.1に示す4種類の水ガラス系注入材を用いた。A液の水ガラスはいずれも原液を2倍に希釈している。

ii) 砂

川砂(鬼怒川産、2mmフルイ通過部)

2.2 模型地盤の造成

i) 砂の充填

図-6.1に示す鉄製の注入槽に砂を三層に分けて水締めしつつ充填した。砂は水分飽和で、平均間隙率は37.8%である。

ii) 温度センサーの配置

図-6.1に示すように、注入槽の側面の穴から白金測温抵抗体あるいは熱電対

表-6.1 供試した注入材

記号	分類	A 液	B 液	ゲルタイム
A	懸濁型	3号水ガラス	セメント懸濁液	7分
B	溶液型有機系	,	グリオキザールリン酸	28分
C	溶液型無機系	,	NaHCO ₃ , KC ₁	9秒
D	溶液型中性系	特殊水ガラス	希硫酸	60分

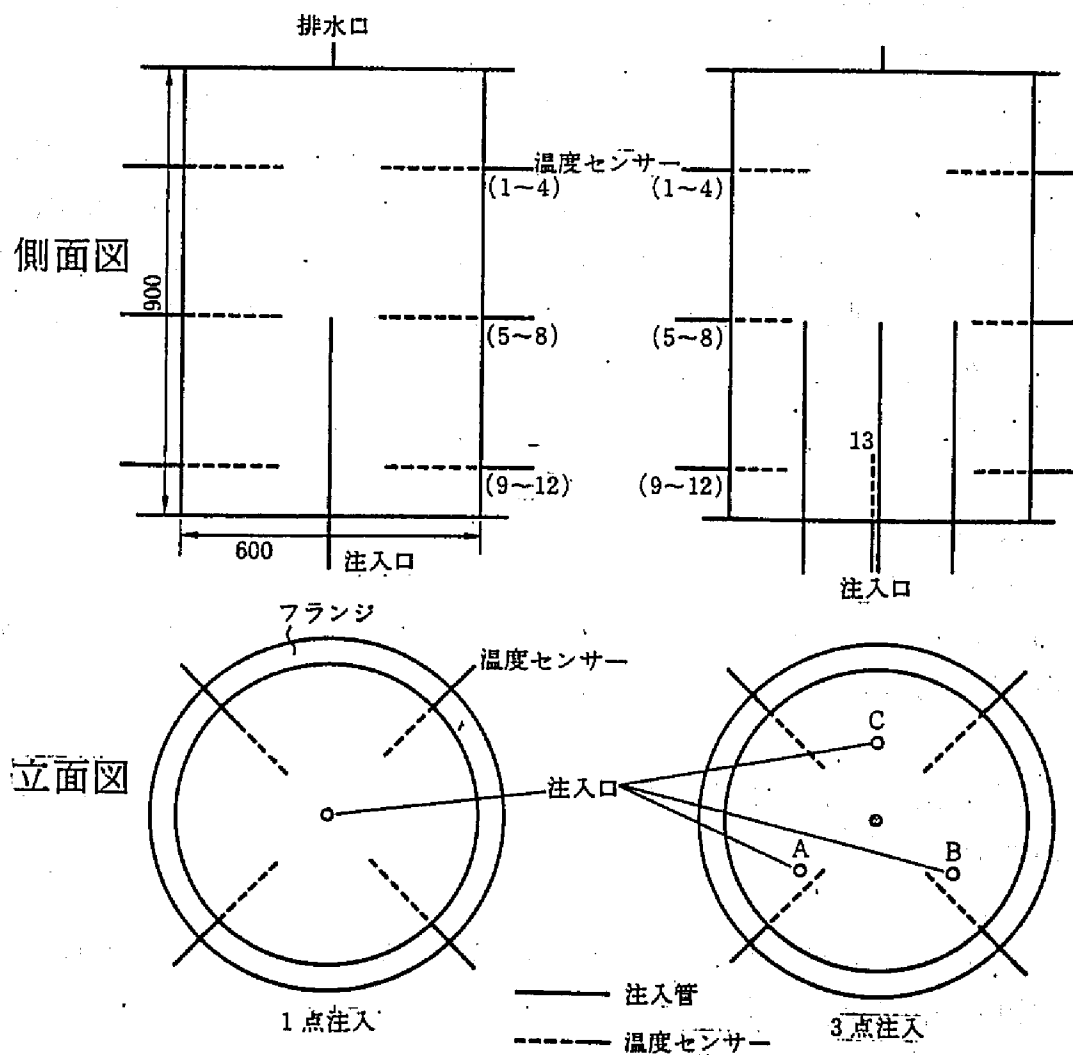


図-6.1 注入槽の注入管、温度センサーの配置

(銅・コンスタンタン)を挿入した。測点は上段、中段、下段とも各4点の合計12点とした。

iii) 注入孔の配置

底部から1本あるいは3本の注入管を挿入した。

2.3 注入

i) 注入方法

定量ポンプで二液を送り、注入口の手前で合流させた。

ii) 注入速度 平均30/min

iii) 注入量 30-500

2.4 測定項目と方法

i) 固結状態の観察

注入の1日後あるいは2日後に注入槽を反転し、砂を削りつつ、フェノールフタレインの発色あるいは切削抵抗によって固結範囲を求めた。

ii) 地盤内の温度

埋め込んだセンサーは高速打点記録計につなぎ、注入前から注入固結体の掘り出しまで連続して温度を自動記録させた。また、掘削断面を放射熱赤外線計測装置であるサーモグラフィ-(日本アビオニクス製)によって撮影し、温度分布画像を得た。

iii) てん充率

センサーを埋め込み位置などの砂を採取し化学分析によって注入材含有量を測定し、てん充率として表示した。

3. 実験結果

3.1 ホモゲルの温度変化

図-6.2にホモゲルの温度変化を示す。ここでは室温および二液を混合する前の液温が異なるが、いずれも混合直後から温度上昇が始まる。温度上昇量、上昇ピークの発現時間は薬液によって異なる。温度上昇量の大きいものはセメントを硬化剤とするAであり

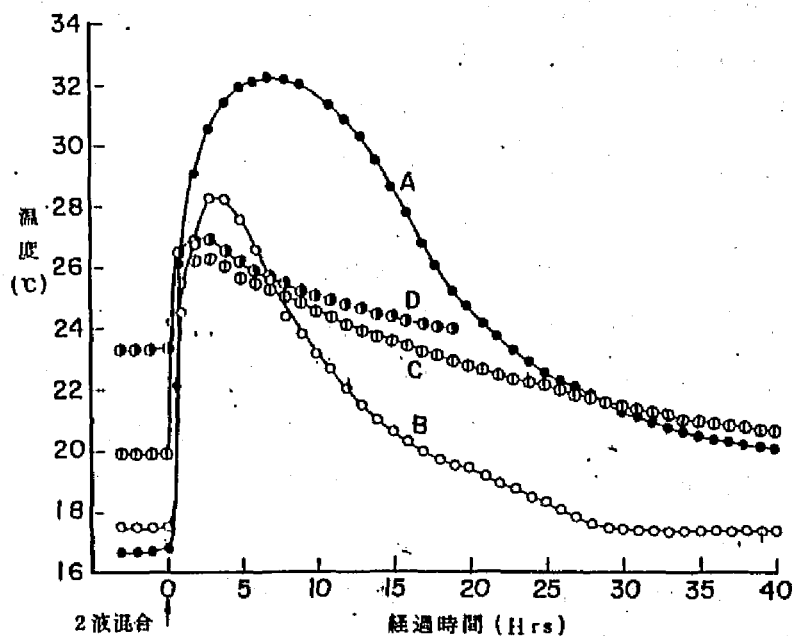


図-6.2 昇温曲線の例

、次ぎにB、C、Dの順となる。また、ピーク発現時間はAで7時間後、Bで4時間後、C、Dで3時間後となり、特にゲルタイムとは対応しない。

なお、各種の注入材の温度上昇量から求めた反応熱は表-6.2のように水ガラス中のアルカリ換算で500-2200J(ジュール)/gとなる。水ガラス中のアルカリの中

表-6.2 水ガラス系注入材の反応熱

種 別	硬 化 剤	水ガラス換算発熱量 J/g	アルカリ換算発熱量 J/g
無機系	セメント	215.4	2267
	酸化アルミ・消石灰他	102.2	1076
	アルミン酸ソーダ	66.8	703
	NaHCO ₃ ・KCI	87.2	917
	NaHSO ₄	53.1	559
有機系	グリオキザール・リン酸	163.6	1722
	グリオキザール・トリアセチン	100.9	1062
	トリアセチン	47.7	502
	炭酸エチレン・リン酸	58.6	616

和熱が約1400J/gである⁷⁾ことを考えると、注入材の反応熱も硬化剤がセメントの場合を除き硬化剤による中和にもとずくと考えられる。したがって、ほとんどの場合さらに温度上昇量を高くすることが可能と思われる。

3.2 注入材の浸透に伴う砂の温度変化

図-6.3に注入材Bを中央の注入管から注入した場合の各測点(図-6.1の中段のもの)の温度変化を示す。注入孔に近いN0.5,6,8のセンサーでは注入開始直後から温度上昇を始め、開始後1-3時間でピークに達した後、徐々に低下する。N0.7のセンサーは注入孔から25cmの位置にあり、注入槽内の観察結果では、ここへは注入材がほとんど浸透していない。したがって、N0.7の温度上昇は注入材の浸透によるものではなく、中心部の固結体からの熱伝導によるものと考えられる。各測点の温度上昇量のうち、注入孔に近接したN0.5が最高で約7℃に及んでいる。

次ぎに、注入材Cを用いた場合の温度変化を図-6.4に示す。ここでも、注入孔に近接したN0.5,6,7のセンサーでは注入開始直後に急激な温度上昇が見られるが、温度上昇量は注入材Bの場合に比べて少ない。注入材Cはホモゲルの温度上昇量も6℃前後であり注入材Bの値の約半分であることを考えれば当然の現象といえよう。

注入孔を3ヶ所に配置し、注入材Bを1時間づつずらして注入した場合の温度変化を図-6.5に示す。まず、A孔の注入とともに近接するセンサー-N0.8とN0.13が温

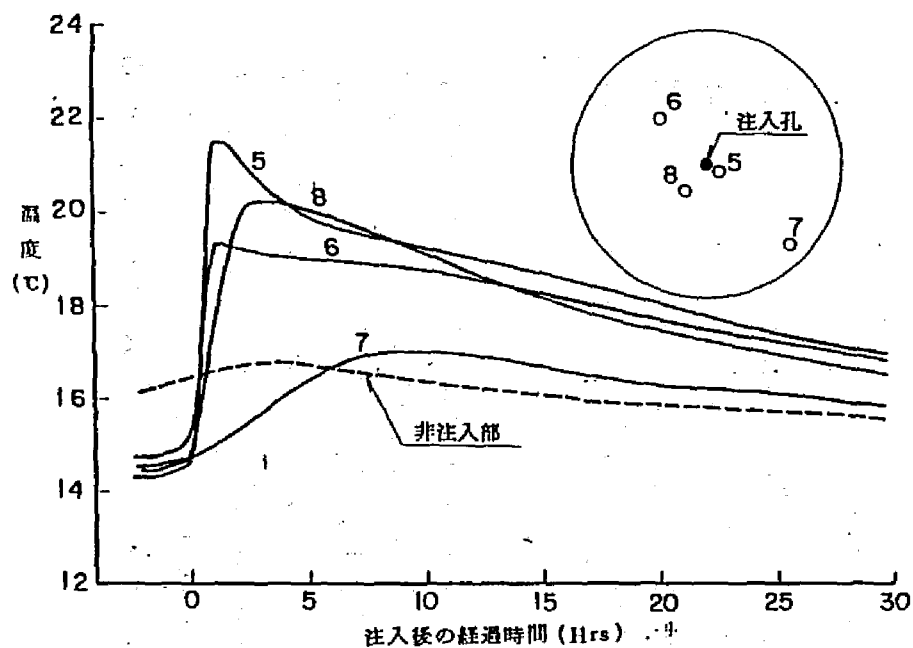


図-6.3 注入槽内の温度変化(注入材B、一点注入)

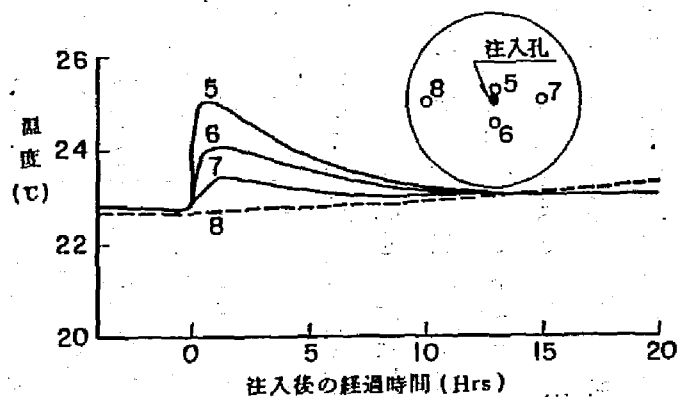


図-6.4 注入槽内の温度変化(注入材C、一点注入)

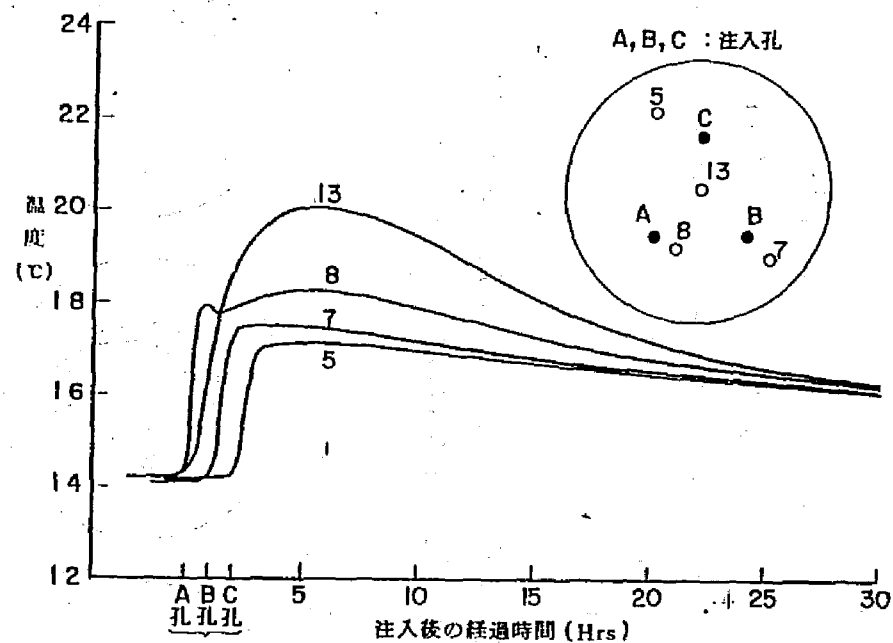


図-6.5 注入槽内の温度変化(注入材B、三点注入)

度上昇を示す。次ぎにB孔の注入が始まると、近接するN0.7の温度が上昇する。さらに、3本目の注入孔Cの注入開始とともにN0.5の温度上昇が始まる。この間、中心のN0.13の温度は上昇し続け、3本の注入孔のすべての影響を受ける。温度上昇量は中心のN0.13が最大で約6℃に及び、N0.8,7,5の順に少なくなる。なお、N0.8の温度はピークが2ヶ所に見られるが、このセンサーは注入孔Aとともに他の注入孔からの注入材の浸透による影響をも受けたことを示している。

3.3 砂の固結状態と薬液の浸透状況

i) 固結状態

注入槽を解体して温度センサーを埋設した三深度について断面を観察し、固結範囲をスケッチした。その結果は図-6.6に示すようであり、注入条件によって少

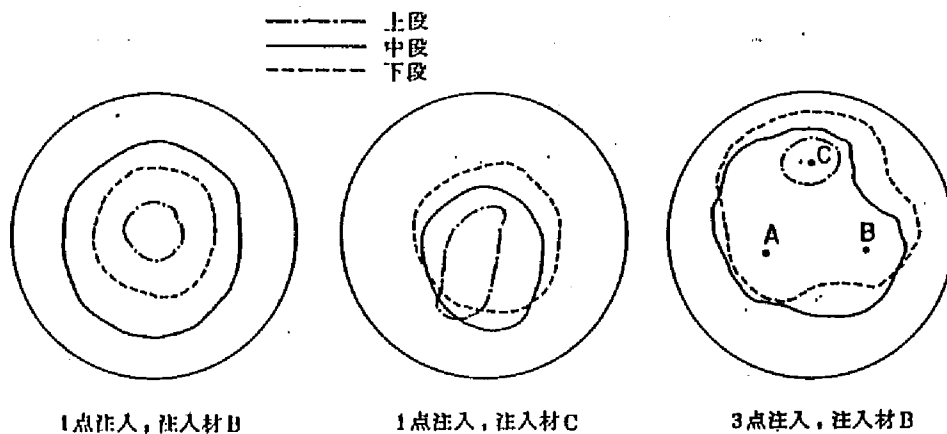


図-6.6 固結体の形状スケッチ

しづつ異なった固結範囲を示している。比較的球状な固結体を得られるのは注入材Bを一点注入した場合である。また、ゲルタイムの短い注入材Cを注入した固結砂ではホモゲルの脈が散在し、注入材の浸透形式が浸透注入だけでなく割裂注入も生じていることを示している。三点注入の場合、固結体は球状ではなく注入孔Cの付近に偏った固結状態を示した。

ii) てん充率の分布

各断面から5cmのピッチで砂をサンプリングし、化学分析により各点の注入材含有量を測定した。この値からてん充率を求め、これをコンタ-図で示したものが図-6.7である。この図は注入材Bを一点注入した場合の例であるが、上段では注入孔の直上のみにわずかな注入材が見られるのに対し、中段、下段では外周を除く大部分に注入材が浸透している。断面を削る際の抵抗から判断すると、てん充率が50%を越える部分が固結範囲かと思われた。なお、てん充率の分布はいずれのケースでも注入孔の付近で高くなるが、その最大値は注入材Bの場合で80-85%、注入材Cの場合で90-100%となる。

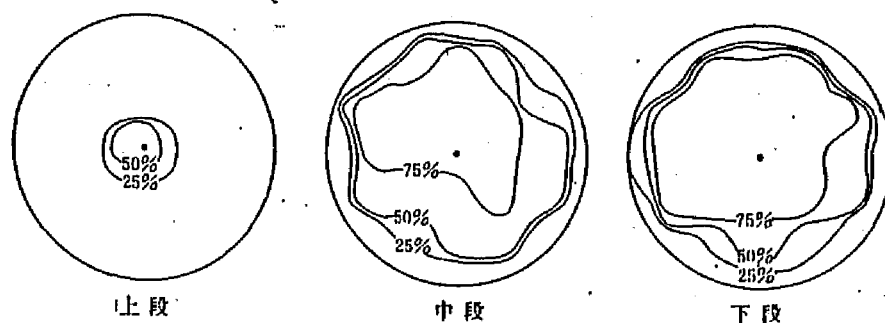


図-6.7 固結体のてん充率分布(注入材B、一点注入)

iii) 各断面の温度分布

ところで、3.2に述べたように注入材の浸透によって砂の温度が上昇する。そこで、掘削断面の温度分布を見ることにより注入材の分布状況を可視化することが可能と考え、掘削断面のサーモグラフィ-画像を撮影した。結果は16色の色分布

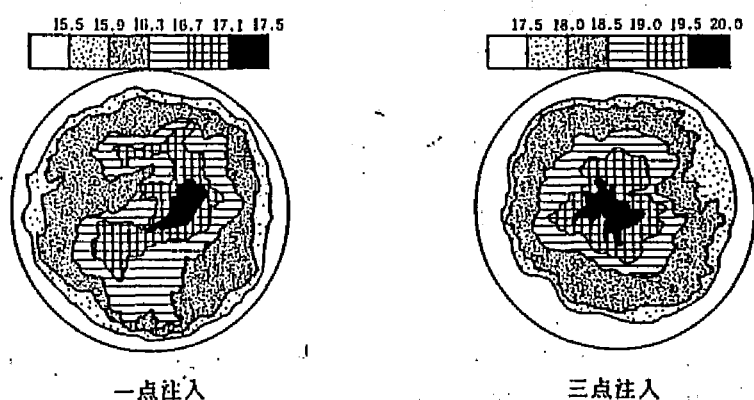


図-6.8 固結体断面のサーモグラフィ-画像

像として得られるが、ここでは図-6.8のように表示した。表示した例は温度上昇の大きい注入材Bを用いた場合についてであり、画像は注入の16-20時間後の中段の掘削断面についてのものである。

図のように、いずれの画像でも断面の中心部に近いほど温度が高く、中心では外周部との温度差は2-3℃に及んでいる。そして、温度が周辺より高い範囲はフェノールフタレインを吹きつけた際の発色範囲とほぼ一致し、注入

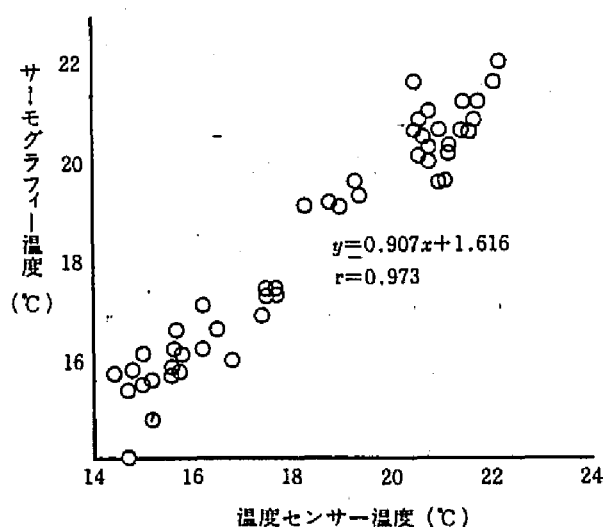


図-6.9 両測定法による温度の相関

材が浸透した部分であることを示す。一点注入と三点注入の温度分布の差は明確ではないが、撮影が注入後一昼夜近く経過してから行われたため、相当な熱伝導が生じ、断面内で温度が平均化されたことを示唆している。なお、例示した二例の温度レベルが異なるのは、実験を行った際の外気温の差によるものである。

また、サ-モグラフィ-による温度と挿入した温度センサ-(白金測温抵抗体)による温度とは図-6.9に示すようにほぼ一致する。

4. 考察

4.1 温度上昇量によるてん充率の推定

飽和度100%の土に注入材が浸透する場合、注入土は土粒子、注入材(ホモゲル)、水で構成されることになる。ここではホモゲルにふくまれる水はホモゲルの一部と考える。そこで、図-6.10に示すように、土、ホモゲル、水の比熱をそれぞれ C_s, C_g, C_w 、密度を G_s, γ_g, γ_w 、占有体積を V_s, V_g, V_w とする。注入範囲の内部では土の境界は断熱されていると仮定すると、熱量のつり合いは次式で示される。

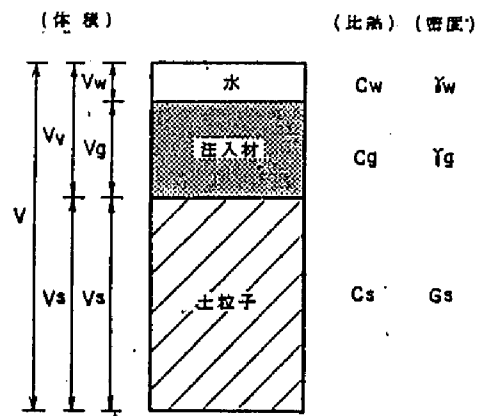


図-6.10 注入土の構成図

$$(T_g - T_i) \cdot V_g \cdot C_g \cdot \gamma_g = (T_i - T_s) (V_s \cdot C_s \cdot G_s + V_w \cdot C_w \cdot \gamma_w) \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 T_g : ホモゲル硬化後の温度 (°C)

T_s : 注入前の地中温度 (°C)

T_i : 注入後の地中温度 (°C)

間隙率 n 、てん充率 λ はそれぞれ(2)式、(3)式で与えられる。

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_g + V_w}{V_s + V_g + V_w} \quad \dots\dots (2) \quad \lambda = \frac{V_g}{V_v} = \frac{V_g}{V_g + V_w} \quad \dots\dots (3)$$

$$(2) \text{式より、} V_s = \frac{1-n}{n} (V_g + V_w) \quad \dots\dots (4) \quad V_w = \frac{1-\lambda}{\lambda} \cdot V_g \quad \dots\dots (5)$$

(4)、(5)式を(1)式に代入すると、

$$(T_g - T_i) \cdot C_g \cdot \gamma_g = (T_i - T_s) \left\{ \left(\frac{1-n}{n} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot G_s \cdot C_s + \frac{1-\lambda}{\lambda} \cdot C_w \cdot \gamma_w \right) \right\} \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 $C_g = C_w = 1 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ 、 $\gamma_g = \gamma_w = 1 \text{ g/cm}^3$ と仮定すると、

$$\lambda = \frac{T_i - T_s}{T_g - T_s} \left(\frac{1-n}{n} \cdot G_s \cdot C_s + 1 \right) \quad \dots\dots (7)$$

(7)式により、 T_g, T_i, T_s の測定結果からてん充率 (λ) を求めることができる。

そこで、 T_g をホモゲルの温度上昇量から求め、各測点の最大値を T_i とし、 T_s を注入直前の温度とし、また、 n を0.378、 G_s を2.6、 C_s を0.207⁵としてセンサ-埋設地点のてん充率を計算した。その結果得られたてん充率は注入材Bの場合、注入孔に近接した位置で75-85%、注入材Cの場合80-90%となった。また、てん充率の分布は

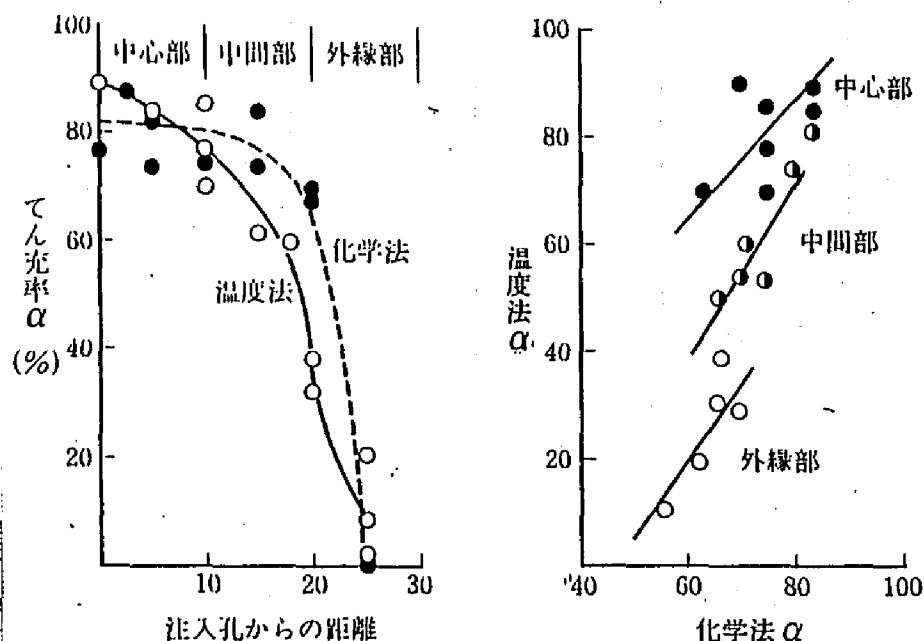


図-6.11 温度法、化学法のてん充率の分布

例えば図-6.11のようになり、中心部では両者はほぼ一致するが、化学法のてん充率が低い注入孔から離れた非固結部でもかなりのてん充率を示すことがある。これは、すでに述べたように中心部の固結体からの熱伝導による温度上昇に起因するものと考えられる。

4.2 推定てん充率と実測てん充率(化学法)の関係

温度測定の結果をもとに(7)式によって求めたてん充率の妥当性を検討するため、化学分析によって求めたてん充率との相関性を見たのが図-6.12である。この図では、温度センサ-にホモゲルが付着して割裂注入が明らかな注入材Cを用いた場合のいくつかの測点については前出の(2)、(3)式が成立しないと考えて除外している。したがって、図-6.12は注入材が粒子間に均一な浸透をした場合についてのものであるが、両方法の相関性は高く、相関係数は0.921である。全般に温度測定によるてん充率が化学法に比べてやや低くなる例が多いが、これはてん充率算出の際の仮定条件である、注入範囲の中での断熱条件という前提

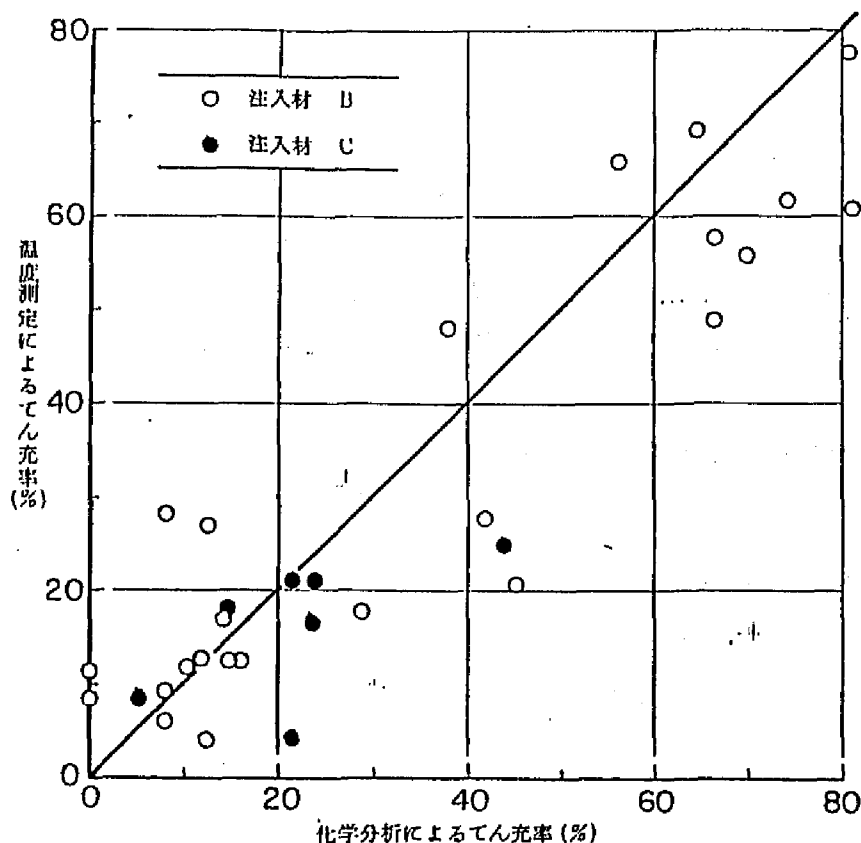


図-6.12 温度法と化学法でのん充率の相関

が厳密には成立していないことを示すものかも知れない。また、温度測定によるてん充率は低てん充率側で大きな値を示すことがある点にも注意が必要である。実際の注入工事の場合には、本来高いてん充率を示すべき注入範囲の内部の予測が重要であるので、実用上は余り問題にはならないと思われる。

5. おわりに

薬液注入工法における地盤改良効果を簡便かつ即時的に判定あるいは推定する手法を確立するためには、注入材による間隙の充填状態を的確に把握する方法が必要である。そこで、水ガラス系注入材がゲル化する際に発生する反応熱に着目し、地中温度の測定によるてん充率の推定についてその可能性を検討した。その結果、現在普及している水ガラス系注入材はいずれもかなりの温度上昇を示し、これらを注入した模型地盤でも有意な温度上昇が認められた。そして、この方法によるてん充率は先に開発した化学分析によるてん充率とも比較的良好に対応することが明らかになった。この方法は従来の効果推定手法に比べて、注入作業中あるいは直後に注入効果を予測しうるので、予測結果を即座に施工に反映させ、注入材の浸透が不十分と推定された位置への再注入を的確に行うこと

ができるので、実用上の意味が大きいと思われる。今後は実際の施工現場に適用し、データの蓄積を図るとともに温度測定結果の解析手法を確立し、予測精度の向上を目指す必要があるが、現場への適用例については第七章で述べる。

第七章 温度測定による注入効果推定に関する現場適用調査

1. はじめに

薬液注入工法による地盤改良効果を推定する手法の開発は長年の課題として各方面で検討されている。現在、強度や透水係数を現位置で調査するものを除き、注入薬液の浸透範囲や固結範囲を推定する手法として開発されているものは第一章に述べたように多種ある。これらの手法を精度、簡便さ迅速性などで評価すると、現状では満足すべきものはなく、実用的な手法の開発が望まれている。著者らは水ガラス系注入材がゲル化、硬化する際に反応熱を発生することを見だし、この現象を利用することによって注入薬液の浸透状況の推定しうることを前章で述べた。前章では室内の小規模な注入実験の結果であったため、温度測定の方法、測定結果の解析など現場スケールに拡張する際にさらに検討すべき問題が残されていた。そこで、地中障害物撤去のために薬液注入工法による地盤改良が実施された現場において、温度測定による注入効果推定法の適用性を検討した。その結果、測定結果の解釈などにさらに検討の余地を残すものの、この手法は注入作業中に注入材の浸透状態を予測するうえで有効であり、予測結果は地盤掘削の際に採取した土の分析結果とも比較的良く一致した。以下に調査の概要を紹介する。

2. 調査方法

2.1. 調査現場の概要

工事はシールド工法による下水道管渠工事を行なうもので、掘削径は3.8 m、掘削形式は泥水加圧式である。掘進途中の地中障害物を撤去するために、一時的に手掘り式とし、その区間は薬液注入工法による地盤改良を行なった。改良対象とした地盤は図-7.1に示すように、砂、砂礫を主体とする。地盤の透水係数は $4.9 \times 10^{-3} \sim 4.5 \times 10^{-2}$ cm/secであり、地下水位はGL-2.5 mに位置する。

2.2. 注入工事

注入は主として止水性の向上を目的とし、均一な地盤改良が可能とされる二重管ダブルパッカー工法が採用された。詳細はつぎのとおりである。

注入深度

GL-7.00～-19.60 m

改良土量 1159m³

注入率 一次注入

(CB:セメントベントナイト) 5%

二次注入

(有機系水ガラス溶液) 37%

ゲルタイム 有機系水ガラス溶液で薬80分

注入管ピッチ 1 m

注入ステップ 3ステップ/1 m

注入速度 同時に5本を並行して注入

注入範囲の平面図、断面図を図-7.2に示す。この注入工法では、①削孔、注入管の設置、②一次注入(CB) ③二次注入(溶液)の順に、別の日に行なわれる。

2.3. 温度測定

温度は地中、注入プラント、大気中で測定し、地中温度はさらに注入管、注入範囲内、注入範囲外に

深度m	記号	土質名	N値	粒度組成	含水比(%)
10	①	砂礫	>50		12.4
	②	砂	13		
	③	シルト混り砂			24.5
12	④	砂	20		12.2
	⑤	砂混り粘土	9		
	⑥	粘土混り砂			
14	⑦	砂礫	43		10.7
	⑧		>50		
16	⑨	砂	>50		20.9
18	⑩	砂礫	>50		15.4
	⑪		>50		
20	⑫	砂礫	>50		13.4

図-7.1 土質性状図

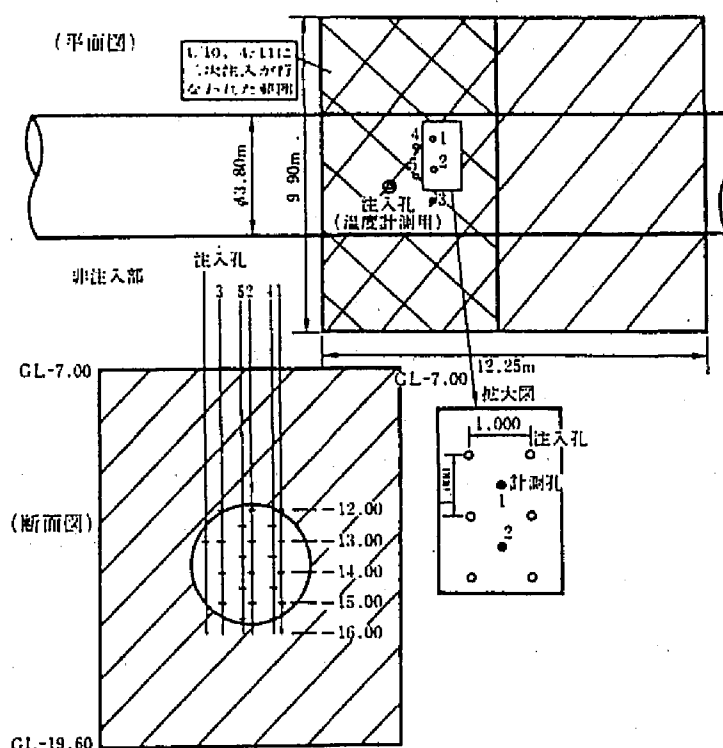


図-7.2 注入範囲と温度測定位置

分け、合計21点の測定を行なった。センサーには熱電対（C C）を用い、各熱電対の配置は図-7.2に示した。注入範囲内では注入薬液の浸透量が最少と思われる、注入孔で囲まれた中心部で温度測定を行なった。また、熱電対の深度はシールド掘削の際に試料土の採取が可能な場所とし、熱電対を所定の深度にセットした後、ボーリング孔は掘削土砂で埋め戻している。

2.4. 注入による地盤改良効果と注入材含有量

改良効果を確認するために注入範囲内で事後のボーリングを行ない、現場透水試験および標準貫入試験を行なった。また、注入材の分布状態を把握するために、ボーリングによりサンプルリング試料および障害物撤去の際に切羽から採取した試料について、第二章の化学分析による方法によって注入材の含有量を測定し、てん充率として表示した。

3. 調査結果

3.1. 地中温度

地中温度の測定結果を図-7.3に示す。（A）は注入管に貼り付けた熱電対の温度変化を示している。二点の測点はいずれも注入前には18℃前後を示すが、一次注入で若干の、二次注入で顕著な変化を示す。すなわち、この注入孔は3月30日に一次注入、4月10日夜間に二次注入が行なわれたが、3月30日には1.5℃前後の一時的な温度低下が見られ、これは一次注入時にシールドグラウトの割裂に用いられる圧力水の水温の影響と思われる。一方、二次注入では両測点とも約6℃の温度上昇が見られ、注入管内のホモゲルの発熱を示している。また、温度上昇のピークがGL-16mの方が約4時間早く見られるが、これは注入が下部から上部へ進むことと対応している。ピークに達した後の温度降下は他の測点に比べて急であるが、注入後5日では当初の地温より高い20℃前後に落ち着く。

（B）、（C）は注入範囲内の地中温度の変化を示す。（B）は深度14m付近の変化であり、注入前はいずれも18℃前後で、0.5℃前後の小刻みな変動が見られる。この変動は注入に先行する削孔の際の、削孔水の影響を示すと考えられる。一次注入の際にNo. 4孔の測定（4-14.5m）で約1℃の温度上昇が見られ、この点にはC Bが浸透していることを示す。一度上昇した地温は急激に下ることは

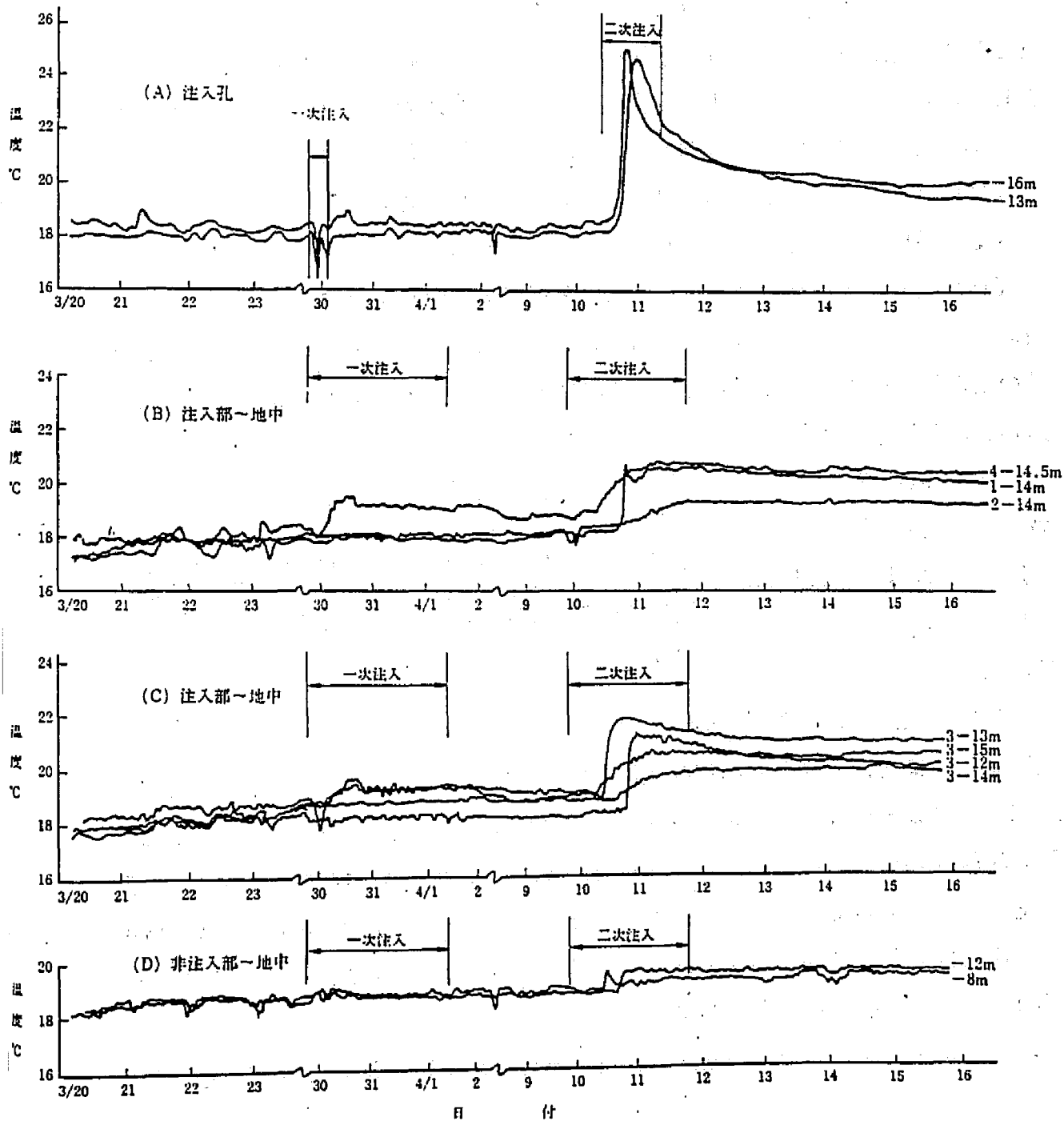


図-7.3 地中温度の変化

なく、10日後でも注入前の温度まで回復しない。二次注入が始まるといずれの測点でも温度上昇するが、上昇開始時刻、温度上昇こう配、温度上昇量はそれぞれに異なる。これらの差異は測点付近の注入薬液の浸透量や浸透速度が異なることを示唆している。このように上昇した温度は急速に低下することはない。

(C) は同一のボーリング孔の深度が異なる測点についての温度変化である。

(B) と同様に一次注入の前に若干の温度変動が見られ、一次注入の際には13mと15mの点で1℃近い温度上昇が見られる。二次注入の際には各深度ともに温度上昇が見られるが、温度上昇開始時刻、温度上昇量などは深度によって異なる。これには、深度による土質の差異、個々の測点と注入孔の距離も削孔精度の差によって微妙に異なることが影響していると思われる。

(D) は非注入部の温度変化である。2深度で測定しているが、いずれも注入前の温度が他の測点に比べてやや高い。注入範囲から8.6 m離れているので注入材の浸透はないと予想していたが、実際には二次注入の際に1℃弱の温度上昇が見られ、溶液系注入材が浸透してきたことを示唆している。

これら各点の温度上昇量のうち、注入範囲内の地中温度の最大値は表-7.1のよ
うにまとめられ、その範囲は、1.1 ~ 3.1℃である。

深度 \ 孔No.	1	2	3
12m	—	—	1.1℃
13m	—	1.5℃	3.1℃
14m	2.3℃	1.6℃	2.8℃
15m	—	0.5℃	1.6℃

深度 \ 孔No.	4	5
12.5m	—	2.2℃
13.5m	2.3℃	2.1℃
14.5m	2.0℃	2.0℃
15.5m	2.3℃	1.8℃

表-7.1 各測点の温度上昇量

3.2. 地盤改良効果と注入材の分布

地盤改良効果を確認するために注入範囲内の2箇所でボーリングを行なった。透水試験はGL-13.5、16.5mで行ない、透水係数はそれぞれ 1.0×10^{-5} cm/sec、 5.6×10^{-6} cm/secが得られた。これらの値は注入前の値の約1/1000であり、十分な止水効果を示している。標準貫入試験では砂礫層は注入前でも $N > 50$ のため正確な比較はできないが、砂層ではN値が10~40のものが2倍以上の値となり、強度的にも十分な改良効果を示している。

ボーリング試料についての注入材含有量から求めた注入材による間隙てん充率

は図-7.4に示すように、
砂層、砂礫層で60～90%
と高い値を示す。また、
シールド掘削の際に切羽
から採取した試料につい
も化学法によるてん充率
を測定した。その結果、
土質はいずれも砂あるい
は砂礫であり、てん充率
は大半が50%以上を示し、
平均値52.1%、標準偏差

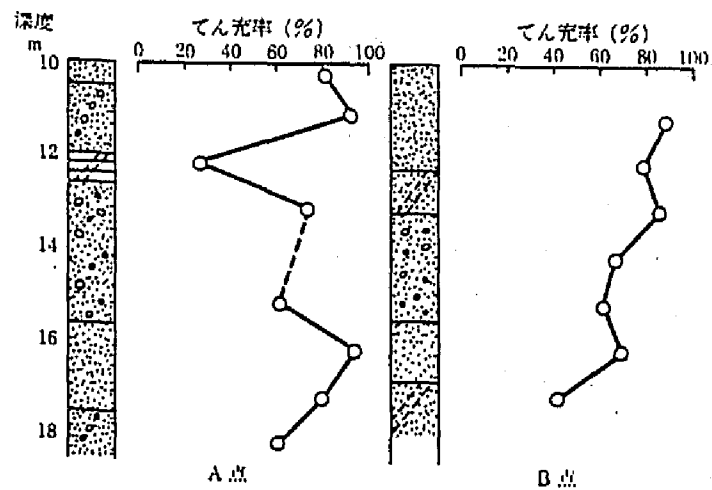


図-7.4 ボーリング試料のてん充率 (化学法)

12.1%と同種の工法を砂礫地盤に適用した

62

実績に比べても均一性の高い注入が行なわれている。

4. 考察

温度測定結果から注入材てん充率を推定するための近似式をつぎのように考える。

すなわち、飽和度100%の土に注入材が浸透すると、注入土は土粒子、注入材（ホモゲル）、水で構成される。それぞれの比熱を C_s 、 C_g 、 C_w 、密度を G_s 、 r_g 、 r_w とし、注入範囲の内部では土の協会は断熱されていると仮定すると、熱量の釣合いは次式で示される。

$$(T_g - T_i) \cdot V_g \cdot C_g \cdot r_g \\ = (T_i - T_s) (V_s \cdot C_s \cdot G_s + C_w \cdot r_w) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T_g ：ホモゲル硬化後の温度（℃）

T_s ：注入前の地中温度（℃）

T_i ：注入後の地中温度（℃）

間隙率 n 、てん充率 α はそれぞれ(2)式、(3)式で与えられる。

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_g + V_w}{V_s + V_g + V_w} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\alpha = \frac{V_g}{V_v} = \frac{V_g}{V_g + V_w} \quad \dots\dots\dots(3)$$

(2) 式より

$$V_s = \frac{1-n}{n} (V_g + V_w) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$V_w = \frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot V_g \quad \dots\dots\dots(5)$$

(4)、(5) 式を(1) 式へ代入すると

$$\begin{aligned} & (T_g - T_i) C_g \cdot r_g \\ &= (T_i - T_s) \left\{ \frac{1-n}{n} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot G_s \cdot C_s + \frac{1-\alpha}{\alpha} C_w \cdot r_w \right\} \quad \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

ここで $C_g = C_w = 1 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$

$r_g = r_w = 1 \text{ g/cm}^3$

と仮定すると、

$$\alpha = \frac{T_i - T_s}{T_g - T_s} \left(\frac{1-n}{n} G_s \cdot C_s + 1 \right) \quad \dots\dots\dots(7)$$

(7) 式によって、 T_g 、 T_i 、 T_s の測定結果からてん充率 α を求めることができる。

そこで、 T_g として注入プラントで測定した注入材の温度、 T_s を 18°C 、 n を 0.35、 G_s を 2.6、 C_s を 0.20 とし、今回の地中温度測定値からてん充率を計算し

た。その結果、てん充率 α は0.151 ~ 0.638、平均値、0.400、標準偏差0.127 となった。

ところで、今回の調査では温度測定を行なった点の近くで試料土を採取し、この試料の化学分析によるてん充率を求めている。その結果は前述のとおりであるが、これと上述の温度測定値から求めたてん充率を比較することができる。両者の対応関係を示したものが図-7.5で

ある。図中には、温度法によるてん充率と化学分析によるてん充率を示しており、両者の測定位置が一致しないものも示している。これらのうち、測定位置が近接するものが9点あるが、近接したものについて両者を比較すると、化学法に比べて温度法の値がてん充率で10%前後低くなるが、ほぼ直線的な関係となる。両

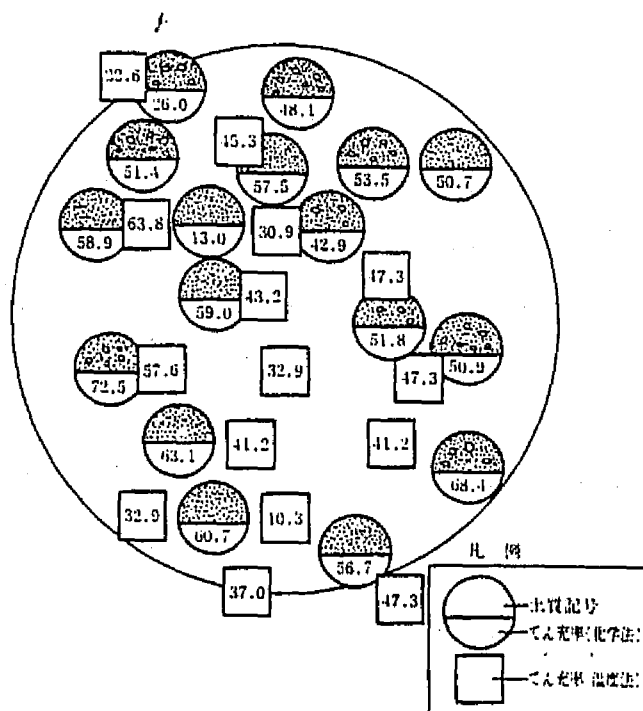


図-7.5 切羽のてん充率分布 (数字はてん充率%)

$$y = 0.842x + 0.910$$

..... (8)

$$r = 0.865$$

ここに、 x : 化学法によるてん充率 (%)

y : 温度法によるてん充率 (%)

温度法によるてん充率が低くなる理由としては注入材の発生する熱量が注入材を送るホースから外気へ、また地中の注入範囲外の地盤へ損失することなどが考えらる。いずれにせよ、温度測定によりてん充率を推定することは不可能ではないといえよう。

なお、注入効果推定手法の実用化に必要な条件には、精度以外の即時性、簡便さがあるが、温度測定による方法は即時性は満足しうる。すなわち、3.1.で述べたよ

うに温度変化は注入作業中に表われ、ある測点への注入材の浸透の有無を時間単位で推定することが可能である。

また、簡便さについては温度センサーを多数埋め込む必要がある点、注入作業の際のリード線を断線しないように注意が必要のため作業能率がやや低下するかも知れないなどが問題となろう。

5. おわりに

薬液注入工法における注入効果推定手法の一つとして前章でその原理、室内実験結果を紹介した温度測定による方法について現場への適用例を述べた。その結果、この手法は注入材の浸透状況を推定する手法として有効であり、精度、即時性、簡便さのいずれの点からも一応満足しうることが判明した。この手法は注入材による間隙てん充率を推定することが可能なため、地盤改良効果の推定へ結びつけやすいと考えられ、この意味でも注入効果推定手法として有効であろう。今後は、地盤条件、注入工法、注入材料などを考慮した本手法の適用方法を検討するとともに、得られた測定結果の解析手法を充実するなどが課題となろう。

第四部 結論

本研究では、我が国に多く分布する滞水性地盤における建設工事に伴う地下掘削に不可欠な地下水対策としての、地中連続壁工法および薬液注入工法による止水技術の改良、開発を土質化学の手法および考え方を用いて遂行した成果を紹介している。以下に、得られた知見の主なものを列記する。

第一部 土質化学の概念を述べるとともに土質化学あるいは土の物理化学に関する既往の研究を紹介した。そして、これらが土質工学上の諸課題の解明に有効であることを吟味した。

第二部 地中連続壁工法における逸泥防止用安定液の開発

① 地中連続壁工法においては安定液が不可欠な効果を有する。この安定液に関する技術は、同じく安定液を用いる石油などのボーリング分野で開発されてきた技術と共通する部分もあるが、施工場所、掘削目的、掘削断面などからより厳しい制約を受ける。

② この工法では掘削溝に安定液を充満させる必要があるが、砂れき地盤などでは安定液が周辺地盤に際限なく逸失する逸泥が発生し掘削不能に陥る。逸泥は地下水汚染をも招くので環境対策上も防止しなくてはならない。

③ 逸泥防止方法には各種のものがあるが、透水係数が 10^{-1} cm/sec以上の地盤に効果的なものはいまだに開発されていない。

④ ガラス玉を模型地盤として安定液の地中での浸透挙動を実験的に検討した結果、透水係数がおおよそ 3×10^{-1} cm/sec以上になるとベントナイトやシルトの懸濁粒子の目詰まりによる逸泥防止は期待できなくなる。

⑤ さらに透水係数が大きな地盤では安定液の流動特性によって逸泥防止が可能になる。

⑥ 逸泥が防止された場合、地盤モデルの表面近くにマッドケーキあるいは止水ゾーンが形成され、さらに地盤の内部では間隙水圧が低下する。このマッドケーキあるいは止水ゾーンを介して液圧が地盤に伝達される。

⑦ 安定液の浸透距離は安定液の粘度と関係づけられ、その関係は細管内のニュートン流体の流動の式であるHagen-Poiseuilleの式に従う。

⑧ ビンガム流体では浸透距離は安定液の降伏値と関係づけられ、降伏値を200 dyne/cm²以上にすれば、透水係数が 10^0 cm/secのガラス玉地盤でも逸泥を防止することができる。

⑨ GuarGum溶液は少量の粘土・シルトが共存すれば、安定なポリマー・粘土複合体を形成し、地盤掘削用安定液に必要な粘度、造壁性を示す。

- ⑩ この溶液はホウ素によって架橋することができ、粘弾性を示すゲルとなる。このゲルはGuarGum、ゲル化剤の濃度を調節することにより粘度を100-100000 cpの範囲で制御することができる。
- ⑪ このゲルは系のpHを調節することにより解ゲル・再ゲル化することができ、この転換は何回でも可能である。転換点のpHは8.0-8.5であり、これより高いpHではゲル化する。
- ⑫ このゲルは透水係数が 10^0 - 10^1 cm/secの地盤モデルでも逸泥防止が可能であり、しかも掘削に支障のない程度の流動性を有する。
- ⑬ 岐阜市内の玉石混じり砂れきの地盤での地中連続壁工法によるビルの地下掘削にGuarGumのゲルを適用した。地盤の平均透水係数は 9.1×10^{-1} cm/secであったが、試験工事によって決定した調合のゲルによって逸泥は完全に防止できた。
- ⑭ 試験工事では安定液による地下水汚染の範囲も調査した。ゲル化させないGuarGum安定液では掘削孔から30mまでの範囲が汚染されるが、ゲル化させることにより周辺の地下水の汚染は完全に防止できる。
- ⑮ 神奈川県の遊水池の遮水壁工事では透水係数が最大 2.2×10^{-1} cm/secの砂れき地盤で地中連続壁工法が計画された。ここでは、現場から約20mの場所に飲用水を汲み上げる揚水井があり、約5000t/dayの揚水を行っていた。試験用に井戸を設け、揚水しつつ近くで安定液による掘削を行う試験工事を行った。試験工事では安定液としてGuarGumゲルを用い、掘削溝の近くに地下水水質を監視する観測井を設けた。
- ⑯ 掘削の際の逸泥は掘削溝の安定液の粘度と関係し、粘度を10000cp以上に維持すれば逸泥をほぼ完全に防止することができる。
- ⑰ 試験工事の際の地下水汚染の範囲は濁度、pH、電気伝導度、過マンガン酸カリウム消費量などによって監視した。掘削中には、掘削溝から8.5mまでの範囲でわずかな水質変化が見られ、3.5mまでの範囲では濁度、過マンガン酸カリウム消費量が水道水基準をこえる。
- ⑱ 掘削の終了とともに水質汚染は減少し、コンクリート打設の際にも、特に地下水がアルカリ化することはない。水質が完全に工事前の状態に復旧するのは、工事終了後約一月の時点である。
- ⑲ 試験工事の結果をふまえ本工事を行った。特に、水源井の近くを施工する時には別に観測井を設け、水質を監視しつつ工事を行った。その結果、逸泥はほぼ完全に防止でき、水源井の水質を汚染させることなく工事を終了した。

第三部 薬液注入工法における注入効果推定法の開発

まず、薬液注入工法の現況を概観し次のような課題を明らかにした。

① 薬液注入工法は広く採用されているが、地盤改良効果の確実性、効果の持続性、注入材の耐久性などに欠ける点を改良する必要がある。特に、改良効果の確実性については改良効果の確認方法の確立が不可欠である。

② 改良効果の確認方法はすでにいくつかの方法が提案されているが、精度、簡便性、即時性などのすべてを満足するものはない。このため、現場の施工管理に用いられる確認方法の確立が切望されている。

つぎに、化学的手法による注入地盤の注入材分布の調査法を考案し、次のような結果を得た。

① 適切な効果確認方法を開発するため、第一段階として注入地盤における注入材の分布状態を調査する方法を検討した。この方法は注入材に由来する非結晶性のケイ酸を化学分析によって測定する方法であり、結果はてん充率として表示することができる。

② この方法を室内注入実験で得た川砂およびけい砂の固結体に適用した。比較的均一な浸透注入が行われた固結体では、実測てん充率のばらつきが少なく、平均てん充率は40-50%となった。脈状注入が行われた固結体ではてん充率のばらつきが大きい。

③ 室内実験における固結体の強度はてん充率の増大とともに増大する。固結体の強度がホモゲルの強度より大きくなるのはてん充率が40-50%をこえる場合である。また、固結体の透水係数が 10^{-5} cm/sec以下となるのも、てん充率が40-50%をこえる場合である。なお、脈状注入の場合にはてん充率が80-100%となっても止水効果は現れない。

④ 化学分析によるてん充率測定法を注入を行った砂地盤に適用した。現場はいずれもシールド工法による下水道、地下鉄などの工事であり、地盤の強化あるいは止水のために注入工法を採用している。ゲルタイムの長い注入材を用いたダブルパッカ-工法の二現場では均一な浸透注入が、ゲルタイムの短い注入材を用いた瞬結工法の三現場では脈状注入が支配的であった。

⑤ 切羽から採取した試料についててん充率を測定した結果、ダブルパッカ-工法を適用した現場(区間)では平均値が40-60%であり、瞬結工法の現場(区間)では平均値が30-40%であった。また、変動係数は前者で0.4、後者で0.5-0.9であり、ダブルパッカ-工法のほうが均一性にすぐれた注入が行われていた。てん充率の平均値は大きくても60%であり、従来注入設計に用いている値に比べてかなり低い。これは、注入材の浸透しうる間隙が土の全間隙ではないことを示している。

⑥ 注入による地盤改良効果とてん充率の関係は十分に認められ、採取したブロックサンプルの圧縮強度はてん充率の増大とともに大きくなる。特に、沖積層の砂は当初は強度がほとんどないが、てん充率が40%をこえると 0.5Kgf/cm^2 以上

の強度を示すようになる。

⑦ 浸透注入の場合には、注入管から50cm離れてもてん充率は40-50%を維持するが、脈状注入の場合には注入管から20cm離れた場所でもほとんど注入材が認められない場合がある。しかし、脈状注入ではホモゲルの脈のまわりに高いてん充率を示す範囲がある。

⑧ てん充率を間接的に推定する手法として、土のpHあるいは電気伝導度の測定が考えられたが、これらはてん充率との関係が良好ではない。

⑨ 滞水性砂れき地盤のシールド工法による掘削に切羽の安定を図るため、二重管ダブルパッカ-工法による注入工法が採用された。その際、適切な注入率を設定するために発進立坑の中で試験工事を行った。調査した。試験工事では注入による透水係数、N値、引っ張り強度の変化、固結体の掘り出しによる固結率などと同時に注入材の分布状態を調査した。

⑩ 懸濁型(CB)の注入率の多少によって注入率を三段階に設定したが、いずれの区でも透水係数は当初の 10^{-2} cm/secから 10^{-5} cm/secに低下し、その他の注入効果にも注入率による顕著な差は認められなかった。固結率(固結体積/注入材の体積)は2.5-3.6に分布し、CBが少ない区(5%)で小さい値を示した。そこで、本工事では懸濁型(CB)を10%、溶液型を23.6%とする組み合わせを採用することにした。

⑪ 試験注入の際のてん充率の分布は注入範囲の上部ではばらつきが多く、下部では50%前後で安定している。注入材の浸透範囲は広く、注入管から2m離れた位置にも浸透している。地盤改良効果はてん充率が30-40%以上の場合に顕著になる。

⑫ 本工事では10リングに一回の割合で切羽の土を採取し、てん充率を測定した。その結果、てん充率は40-80%の範囲に分布し、変動係数は0.35前後であった。また、一部区間で崩壊事故が発生したが、その原因は切羽の砂れきの中にブロック状に点在する砂に薬液が十分に浸透しなかったことにあることがてん充率測定の結果から判定された。

⑬ 砂および砂れきからなる地盤で各種の注入工法を試験注入によって比較した際に、一般の土質調査、土質試験とともに注入材の分布を調査した。各工法のうち、単管ロッド工法では全体的にてん充率が低く、瞬結工法ではてん充率のばらつきが大きい。一方、二重管ダブルパッカ-工法ではてん充率のレベルが50%前後と高く、ばらつきが少ない。また、交互注入工法および複合注入工法は粗砂層では浸透注入であり、平均てん充率は40-50%を示す。

⑭ 本工事のシールド工事では区間によって注入工法を変えた。一部区間で土砂の流出が発生したが、その原因は掘削切羽に局部的に薬液が浸透不十分であっ

たためである。てん充率が20%以下の所で土砂流出が発生する傾向が見られた。

⑤ 複合注入工法ではゲルタイムの短い注入材(S)とゲルタイムの長い注入材(L)を任意の比率に調節しながら注入できるが、その最適な比率は地盤によって異なる。採取した土の化学分析結果によれば、てん充率が最も高くなるのは、この現場ではこの比率(S/L)が0.75前後の場合であった。

これらの結果をふまえ、さらに簡便なてん充率の推定法として水ガラス系注入材のゲル化の際の反応熱に着目した、温度計測による方法を検討し以下の結果を得た。

① 水ガラス系注入材はゲル化の際に3-16℃の温度上昇を示す。この温度上昇は水ガラスと硬化材の混合直後から始まる。

② 砂を用いた模型地盤への注入実験でも、注入材が温度センサー-埋設位置へ浸透すると明瞭な温度上昇が見られる。温度のピークは注入後1-2時間までに現れるが、一日後でも温度上昇の影響は残留する。

③ 温度上昇量から注入材による間隙てん充率を計算することができ、この方法による値は化学分析によるてん充率と高い相関性を示す。

④ この方法を砂れき地盤に二重管ダブルパッカ-工法によって注入した現場に適用した。地中に埋設した熱電対(銅・コンスタンタン)は注入前には18℃前後の値を示すが、近くで注入が行われると最高3.1℃の温度上昇を示す。

⑤ 温度上昇から計算されるてん充率は10-70%の範囲となり、化学分析によるてん充率との相関係数は0.865であった。この方法では注入の最中あるいは直後に注入材の浸透状況が推定できるので、注入工法の施工管理手法のひとつとして活用することが可能である。

以上の結果は地中連続壁工法および薬液注入工法の適用分野の拡大、信頼性の向上に大きく寄与できると思われる。また、ここで用いた土質化学的手法はこれらの工法だけでなく、さらに広範囲の工法の改良、開発あるいは土質工学的問題の解明に有効であると思われる。本研究が今後の土質工学、地盤改良工法の発展の一助となれば幸いである。

謝 辞

本研究は著者が勤務する(株)大林組技術研究所において昭和44年から昭和60年にかけて行ってきた研究成果をまとめたものである。一連の研究は土質化学の分野の大先輩であり所属する研究室の上司である喜田大三氏(現大林組技術研究所副所長)の御指導、御鞭達のもとに行ってきた。また、寺沢一夫・前所長および河野彰・現所長には研究の便宜を図って頂くとともに力強い激励、助言を頂いた。まず、これらの方々にも心から感謝の意をあらわしたい。

また、本研究は化学研究室の同僚に助けられながら実施したものであり、とくに斎藤裕司、辻博和、炭田光輝の各氏および西村幸江嬢には実験、結果の解析あるいは論文の作成の際に大変お世話になった。さらに、本研究に不可欠であった現場調査では多くの現場関係者の協力を得た。とくに、山内英治氏、坂村卓司氏、中川金爾氏の現場所長の方々には快く調査に応じて頂くとともに便宜を図って頂いた。これらの方々にも心からお礼を申し上げたい。

さらに、本論文をまとめるに当たり適切な助言と激励を頂いた久馬一剛・京都大学農学部教授には学生時代から今日に至るまで研究の基本姿勢をはじめ実に多くのことを御教示頂いた。心から厚い感謝の意をあらわしたい。

参考文献

第一部

- 1) 最上武雄監修：透水設計へのアプローチ, 90, 鹿島出版会(1976)
- 2) 喜田大三：土壌構造と結合物質の作用および改良剤の利用に関する研究(学位論文), 1(1961)
- 3) 山崎・山内監訳：土質工学の基礎, 鹿島出版会(1972)
- 4) 安原・山内：土の物理化学と土質工学への応用, 土と基礎, Vol. 33-12, 47-54 (1985)
- 5) 浅川美利：土質工学における粘土構造の問題, 表面, Vol. 8-12, 12-26(1970)
- 6) 山内豊聡：土の物理化学と土質工学への応用, 土と基礎, Vol. 33-4, 79, (1985)
- 7) 土質工学会：小特集 土の物理化学的性質-工学へのアプローチ, 土と基礎, Vol. 28, No. 2(1980)
- 8) 土質工学会編：土質工学における化学の基礎と応用(1978)
- 9) 山内・松原・安原：土の物理化学と土質工学への応用, 土と基礎, Vol. 34-6, 67-68, (1986)

第二部

- 10) 斎藤二郎：地下連続壁の現況と今後の展望, 基礎工 Vol. 8 No. 11, 2-9, (1980)
- 11) 沖野文吉：ボーリング用泥水, 技報堂(1986)
- 12) 喜田大三：地中連続壁工法(泥水工法)における地盤掘削用泥水に関する研究(学位論文)(1975)
- 13) 喜田・川地：泥水の基本的性質, 基礎工 Vol. 10 No. 5, 6-14(1982)
- 14) 浅川・吉田：安定液による壁面安定の機構, 土と基礎 Vol. 21, No. 1, 31-37 (1973)
- 15) 喜田・中田：OWS・SOLETANCHE工法の泥水の造壁性の現場調査と管理, 大林組技術研究所報, No. 4, 101-106(1970)
- 16) 喜田大三：地中連続壁工法における安定液の調合と管理, 土と基礎 Vol. 21, No. 1, 25-30(1973)
- 17) 喜田・川地：高分子・粘土複合体の泥水工法への適用, 土と基礎 Vol. 28, No. 2, 23-30(1980)
- 18) 喜田・川地：ポリマ-泥水におけるポリマ-・粘土複合体の役割, 第10回土質工学研究発表会講演集, 1007-1010(1975)
- 19) T. Kawachi and D. Kita: Development of Slurry Suitable For Diaphragm Wall Construction, The First East Asia Conference on Structural

Engineering and Construction, Vol.1, 281-289(1986)

- 20) 川地・喜田・辻: ポリマ-泥水の変質防止法, 第17回土質工学研究発表会講演集, 1021-1024(1982)
- 21) 喜田・川地: 安定液の機能と品質管理, 建設機械, Vol.22, No.7, 27-32(1986)
- 22) 日本建設機械化協会編: 地下連続壁工法設計・施工ハンドブック, 177-179(1975)
- 23) 喜田・川地・秋野: 講座“施工と水”4 地中連続壁工法と水, 土と基礎, Vol.27, No.11, 73-80(1979)
- 24) 喜田・川地: アッシュ添加泥水による逸泥防止法の検討, 大林組技術研究所報, No.5, 120-126(1971)
- 25) 喜田・川地: 砂地盤用逸泥防止泥水の検討, 大林組技術研究所報, No.23, 96-100(1981)
- 26) 田中他: 講座 シールドと土質 3 切羽などの安定と土質(その2), 土と基礎, Vol.25, No.7, 71-76(1977)
- 27) 喜田・川地: 泥水シールド工法における泥水に関する研究(その1)-粗粒地盤における泥壁の形成について-, 大林組技術研究所報, No.17, 76-80(1978)
- 28) 喜田・炭田・川地・辻: 泥水シールド工法における泥水に関する研究(その2)-砂れき地盤における泥水の品質管理-, 大林組技術研究所報, No.29, 140-144(1984)
- 29) 喜田・炭田・川地・辻: 泥水シールド工法における砂れき地盤の泥水の品質管理, 第19回土質工学研究発表会講演集, 1413-1414(1982)
- 30) 化学工学便覧, 104, 丸善(1968)
- 31) G.K.Jones: Grout and Drilling Muds in Engineering Practice, 26, Butterworths, London(1963)
- 32) 久保田・河野・宇野: 透水-設計へのアプローチ, 75-79, 鹿島出版会(1976)
- 33) 喜田・川地: 泥水工法における泥水管理に関する研究(第21報)-逸泥防止用ポリマ-泥水の開発-, 大林組技術研究所報, No.12, 93-100(1976)
- 34) 喜田・川地: 逸泥防止用ポリマ-泥水の開発, 第10回土質工学研究発表会講演集, 1011-1014(1975)
- 35) 喜田大三: 粘土をつなぐ高分子, 高分子, Vol.13, (1964)
- 36) Donald H. Napper: Colloid Stability, Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Develop., Vol.9, No.4(1970)
- 37) 岡 小天編著: レオロジー入門, 208-226, 工業調査会(1970)
- 38) Roy L. Whistler: Industrial Gums, 303-321, Academic Press(1973)
- 39) 川地・喜田: 地中連続壁工法における地下水汚染の防止-砂れき地盤におけ

る高粘度安定液による逸泥防止-,大林組技術研究所報, No. 32投稿中

第三部

- 40) 土質工学会編: 薬液注入工法の調査・設計から施工まで, 11-12(1985)
- 41) 森: 建設工事における薬液注入の役割, 基礎工, 10-EX, 2-6(1983)
- 42) 工藤他: グ라우チングの基礎知識(その1)-グラウチングの現状と問題点-, 農業土木学会誌, Vol. 51, No. 12, 65-71(1983)
- 43) 福岡正己編: 最新の薬液注入工法の設計と施工例, 40(1983)近代図書
- 44) 建設省: 薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針について, 建設省官技発第160号(1974)
- 45) 柴崎: グ라우チングの基礎知識(その7)-薬液注入(Ⅱ)-, 農業土木学会誌, Vol. 52, No. 7, 51-58(1984)
- 46) 落合他: 硫酸イオンを含む地盤における住宅基礎, 土と基礎, Vol. 34, No. 6, 45-50(1986)
- 47) 土質工学会: 薬液注入工法の調査・設計から施工まで, 165-190(1985)
- 48) 川地・喜田: 薬液注入工法における施工管理に関する研究(その7)-温度測定による注入効果推定に関する現場適用調査-, 大林組技術研究所報 NO. 32, 72-76(1984)
- 49) 川地・喜田: 無公害グラウトに関する研究(その4)-土中の注入材含有量測定法の開発とその適用例-, 大林組技術研究所報 NO. 25, 80-84(1982)
- 50) 川地・喜田: 注入地盤における注入材分布の測定, 土木学会第37回年講Ⅲ, 611-612(1982)
- 51) 川地・喜田: 薬液注入工法における施工管理に関する研究(その3)-注入固結体の物性とてん充特性の関係-, 大林組技術研究所報 NO. 28, 103-107(1984)
- 52) 川地・喜田: 薬液注入砂のてん充率と注入効果の関係, 土木学会第38回年講Ⅲ, 443-444(1983)
- 53) Hashimoto, I. and Jackson, M.L.: Clays and Clay Minerals, 7, 102(1960)
- 54) Ralph K. Iler : The Chemistry of Silica , 40-49(1979)
- 55) 土質工学会編: 土質試験法
- 56) 久保田他: 透水--設計へのアプローチ, 15-20, 鹿島出版会(1976)
- 57) 川地・喜田: 薬液注入工法における施工管理に関する研究(その1)-砂地盤における注入材の分布と注入効果-, 大林組技術研究所報 NO. 26, 120-125(1983)
- 58) 川地・喜田: 薬液注入工法における施工管理に関する研究(その2)-試験注入時における注入材の分布と注入効果-, 大林組技術研究所報 NO. 27, 82-86

(1983)

- 59) 水収支研究グループ編：地下水資源学, 274-276, 共立出版社(1973)
- 60) 土木学会編：水理公式集, 365(1977)
- 61) 土質工学会：薬液注入工法の調査・設計から施工まで, 65-89(1985)
- 62) 川地・喜田：薬液注入工法における施工管理に関する研究(その4)-滞水性砂れき地盤における薬液注入の効果-, 大林組技術研究所報NO. 29, 134-139 (1984)
- 63) 野・川地・喜田・山内：滞水性 砂れき地盤における薬液注入の効果と注入材の分布, 土木学会第39回年講Ⅲ, 279-280(1984)
- 64) 野・川地・喜田・山内：滞水性 砂れき地盤における薬液注入の施工例, 第19回土質工学研究発表会講演集, 1527-1528(1984)
- 65) 川地・喜田：薬液注入工法における施工管理に関する研究(その5)-注入材分布から見た注入工法の比較-, 大林組技術研究所報NO. 30, 117-122 (1985)
- 66) 川地・喜田：注入材分布から見た各種注入工法の比較, 第20回土質工学研究発表会講演集, 1681-1682(1985)
- 67) 川地・喜田：各種注入工法を適用した事例におけるてん充率の分布, 土木学会第40回年講Ⅲ, 625-626(1985)
- 68) 島田：薬液注入の設計と施工上の問題点とその考え方, 基礎工, 10-EX, 32-44 (1983)
- 69) 川地・喜田：薬液注入工法における施工管理に関する研究(その6)-温度計測による注入効果推定に関する基礎実験-, 大林組技術研究所報NO. 31, 119-123 (1985)
- 70) 川地・喜田：地中温度計測による薬液注入の効果予測, 土質工学シンポジウム発表集, 27-32(1986)
- 71) 吉住他：薬液注入における注入範囲の電氣的測定, 土と基礎, Vol. 24, No. 1, 43-50(1976)
- 72) 鈴木：電気抵抗による注入効果の判定について, 土木学会第37回年講, Ⅲ 615-616(1982)
- 73) 有泉他：ほう素をトレーサ-とした中性子水分計の薬液注入施工管理への応用, 第4回土質工学研究発表会講演集, 387-390(1969)
- 74) 日本化学会編：化学便覧(基礎編Ⅱ), 949, (1975)
- 75) 八幡：土壌の物理, 131, 東京大学出版会(1975)
- 76) 川地・喜田：薬液注入工法における施工管理に関する研究(その7)-温度測定による注入効果推定に関する現場適用調査-, 大林組技術研究所報NO. 32, 72-76 (1986)